



Universitat Ramon Llull

TESIS DOCTORAL

Título Una metodología para caracterización elastoplástica cuasi-estática simplificada de materiales termoplásticos inyectados en proceso industrial para simulación estructural

Realizada por Josep Maria Puigoriol i Forcada

en el Centro *IQS School of Engineering*

y en el Departamento de *Enginyeria Industrial*

Dirigida por el Dr. Salvador Borrós i Gómez y el Dr. Guillermo Reyes Pozo

Hi ha el desig hàbil
d'aquest aprenentatge
encara verge.

L'emoció –encara–
de saber-se a l'inici.

Tannka. Juny del 2011

Al meu pare, qui no ha pogut veure-la acabada.

AGRADECIMIENTOS

Voldria fer arribar el meu agraïment a totes aquelles persones que m'ha ajudat en aquesta investigació i a tots aquells que hi han cregut. El meu agraïment especial:

Als meus directors Dr. Salvador Borrós i Dr. Guillermo Reyes, per la seva valuosa i constant ajuda, pels seus consells i el seu mestratge. Agrair el seu recolzament i la seva estima.

Al Sr. Vicente Climent, director general de *Faurecia Interior Systems* plataforma Abrera, i Sr. Reinhold Erb, director del departament de disseny, pel proveïment de peces, bases de dades, materials i software durant aquesta tesi doctoral. Per tots els moments viscuts al llarg dels darrers 11 anys.

Als companys del Departament d'Enginyeria Industrial de l'*IQS School of Engineering* i de *Faurecia Interior Systems*, plataforma Abrera. Gràcies per la seva actitud professional i humana. També el meu agraïment a la Sra. Mercedes Peña i Sr. César Alquezar, per facilitar-me les accions realitzades al laboratori.

A la Núria, la meva mare i la meva família, per la seva comprensió, paciència i suport incondicional.

No voldria oblidar-me dels meus amics i companys; els seus ànims al llarg de tot aquest procés han estat molt presents.

RESUMEN

En esta investigación se plantea una metodología de caracterización de materiales para alimentar el modelo constitutivo elastoplástico clásico de von Mises con endurecimiento isotrópico, para una mejor respuesta en simulaciones computacionales estáticas (CAE) de piezas fabricadas con termoplásticos. Esta estrategia de caracterización debe resultar simple en cuanto a aplicación, para facilitar el uso en el ejercicio habitual en industria.

Se presentan los modelos constitutivos usualmente utilizados en el sector industrial para dar respuesta a problemas de no linealidad de material en estática, para este tipo de polímeros, que requieran tan solo del ensayo de tracción en máquina universal. Se acompaña de una declaración de las variables más influyentes en la respuesta computacional. La metodología propone el uso de un Factor de Escala Máster que permita la reducción de la curva elastoplástica para una familia de materiales. Este factor de reducción se utiliza, a su vez, para la definición del límite de fluencia y del módulo secante elástico de cálculo.

Se ha procedido a evaluar el comportamiento mecánico de una selección de cuatro materiales, representativos de familias utilizadas en sistemas de interior de automóviles, mediante muestras recortadas de componentes reales. De esta forma, se comprueba el descenso de las propiedades mecánicas de estos materiales en un contexto de inyección usual en proceso industrial. La nueva estrategia de caracterización se alimenta de esta información hallada mediante el ensayo de tracción.

Se realiza la validación de la metodología a través de un ensayo híbrido test-simulación sobre pieza real inyectada.

Finalmente se lleva a cabo un ejercicio de verificación de la estrategia de caracterización sobre un conjunto real Módulo Panel Puerta, mediante correlación experimental.

RESUM

En la present investigació es planteja una metodologia de caracterització de materials per alimentar el model constitutiu elastoplàstic de Von Mises amb enduriment isotròpic, per obtenir una millor resposta en simulacions computacionals estàtiques (CAE) de peces fabricades amb termoplàstics. Aquesta estratègia de caracterització ha de resultar simple pel que fa a aplicació, per a facilitar l'ús en l'exercici habitual d'indústria.

Es presenten els models constitutius usualment utilitzats en el sector industrial per donar resposta a problemes de no linealitat de material en estàtica, per aquest tipus de polímers, que requereixin tan sol de l'assaig de tracció en la màquina universal. S'acompanya d'una declaració de les variables més influents sobre la resposta computacional. La metodologia proposa l'ús d'un Factor d'Escala Màster que permeti la reducció de la corba elastoplàstica per a una família de materials. Aquest factor de reducció s'utilitza, a la vegada, per la definició del límit de fluència i del mòdul secant elàstic de càlcul.

S'ha avaluat el comportament mecànic d'una selecció de quatre materials, representatius de famílies utilitzades en sistemes d'interior d'automòbils, mitjançant mostres retallades de components reals. D'aquesta forma, es comprova el descens de les propietats mecàniques d'aquests materials en un context d'injecció usual en procés industrial. La nova estratègia de caracterització s'alimenta d'aquesta informació obtinguda en l'assaig de tracció.

Es realitza la validació de la metodologia a través d'un assaig híbrid test-simulació sobre peça real injectad

Finalment s'ha efectuat un exercici de verificació de l'estratègia de caracterització sobre un conjunt real Mòdul Panell Porta, mitjançant correlació experimental.

SUMMARY

This research project proposes a methodology for characterization of materials to feed the traditional elasto-plastic model with Von Mises isotropic hardening criterion. This is to achieve a better response in static computer simulations (CAE) for thermoplastic parts. This characterization strategy must be simple in application to facilitate regular use in industry.

The models normally used in industry are presented to address issues of static material non-alignment for this class of polymers, only requiring the universal tensile strength machine test. It is accompanied by a statement of the most influential variables in the computational response. The methodology proposes the use of a Master Scale Factor that allows the reduction of the elasto-plastic curve for a class of materials. This reduction factor is used in turn to define the yield stress and the young modules.

An evaluation of the mechanical behaviour from a selection of four materials is undertaken, representative classes of materials used in automotive interior systems. This was done by using samples cut from real components. Thus, the decrease of the mechanical properties of these materials in the context of the usual industrial injection process was evaluated. The new strategy characterization is fed by this information gained by the tensile strength test.

A validation of the methodology is undertaken through a simulated hybrid test on an actual injected part.

Finally, a verification exercise of the characterization strategy is conducted on a real door panel module assembly, through experimental correlation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contextualización y motivación del estudio	1
1.2. Alcance de la metodología	3
1.3. Objetivos	5
1.4. Novedad de la metodología de caracterización	6
1.5. Estructuración de la tesis doctoral	7
1.6. Bibliografía	10

CAPÍTULO 2

MODELOS CONSTITUTIVOS PARA CARACTERIZACIÓN CUASI-ESTÁTICA ESTRUCTURAL

2.1. Propiedades mecánicas de los polímeros	11
2.2. Modelos elásticos	15
2.2.1. Modelo constitutivo elástico lineal	15
2.2.2. Modelo constitutivo elástico lineal multipendiente	17
2.2.3. Modelo constitutivo hipoeelástico	18
2.2.4. Modelo constitutivo hiperelástico	18
2.2.5. Praxis industrial de los modelos elásticos para simulación estática. Descarte para la nueva metodología	19
2.3. Modelos elastoplásticos	19
2.3.1. Criterio de plastificación o de fluencia	21
2.3.2. Regla de flujo	23
2.3.3. Regla de endurecimiento	23
2.3.4. Criterios de plastificación para polímeros. Selección para la nueva metodología	25
2.3.4.1. Criterio de plastificación de Tresca-Guest	27
2.3.4.2. Criterio de plastificación de Von Mises	28
2.3.4.3. Criterio de plastificación lineal de Drucker-Prager	31
2.3.5. Selección de la regla de flujo	32

2.3.6. Selección de la regla de endurecimiento	32
2.4. Bibliografía	33

CAPÍTULO 3

INFLUENCIA DE DISTINTAS VARIABLES SOBRE LA RESPUESTA DEL EJERCICIO HÍBRIDO TEST-SIMULACIÓN

3.1. Variables en relación a la curva tensión-deformación, variables curva	35
3.1.1. Límite de fluencia σ_Y	36
3.1.2. Módulo elástico a tracción E_T	40
3.1.3. Tensión y deformación verdadera σ_T, ε_T	43
3.1.4. Corrección de la curva verdadera a partir del punto máximo	46
3.1.5. Variación del coeficiente de Poisson ν	49
3.1.6. Influencia de la orientación según el flujo de inyección	49
3.1.7. Influencia de otros parámetros en inyección de pieza. Probeta recortada	52
3.1.8. Influencia de la temperatura	54
3.1.9. Influencia de la velocidad de deformación $\dot{\varepsilon}$	55
3.1.10. Influencia del método de lectura en el ensayo	57
3.1.11. Influencia del tipo de ensayo	58
3.1.12. Envejecimiento natural del material	60
3.2. Variables en relación al modelo MEF	61
3.2.1. Tipo de no linealidades	61
3.2.2. Tipo de elemento	65
3.2.2.1. Elementos tipo Placa (Shell)	65
3.2.2.2. Elementos tipo Sólido (Solid)	68
3.2.3. Grado del elemento	68
3.2.4. Densidad de malla	69
3.2.5. Calidad de malla	69
3.2.6. Coeficiente de fricción	70
3.2.7. Rigidez del elemento de contacto	71
3.3. Bibliografía	72

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA CUASI-ESTÁTICA SIMPLIFICADA PARA MATERIALES TERMOPLÁSTICOS

4.1. Propuesta de la metodología de caracterización	80
4.2. Etapa 0. Factor de escala	82
4.2.1. Factor de escala para un material, FE_{Mat}	82
4.2.2. Factor de Escala Máster, $FE_{Máster}$	83
4.3. Etapa 1. Uso Metodología	84
4.3.1. Variables relacionadas con la definición de la curva	84
4.3.2. Variables relacionadas con la simulación estructural	86
4.4. Ejemplo de aplicación de la metodología de caracterización, variable curva	88
4.5. Bibliografía	96

CAPÍTULO 5

OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

5.1. Selección de los materiales de estudio	97
5.2. Forma y dimensionado de las probetas ideales	98
5.3. Datos probeta ideal	100
5.3.1. Curvas material PPT16a, probeta ideal	100
5.3.2. Curvas material PPT16b, probeta ideal	101
5.3.3. Curvas material PPT30, probeta ideal	102
5.3.4. Curvas material ABS, probeta ideal	103
5.4. Datos probeta recortada	104
5.4.1. Componentes fuente para extracción de probetas recortadas	104
5.4.1.1. Componente Cuerpo consola central (CC). Material PPT16a	105
5.4.1.2. Componente Pieza Inserto (INS). Material PPT316b y ABS	106
5.4.1.3. Componente Pieza Estructural consola central (PE). Material PPT30	107
5.4.1.4. Panel Delantero (PD). Material PPT16b	107
5.4.1.5. Panel Trasero (PT). Material PPT16b	108
5.4.1.6. Armazón Asidero (AA). Material ABS	108
5.4.2. Identificación de las muestras de extracción. Trazabilidad	109

5.4.3. Dimensiones de las muestras de extracción	111
5.4.4. Obtención de las muestras	112
5.4.4.1. Mapa de ubicación de las muestras componente Cuerpo Consola	113
5.4.4.2. Mapa de ubicación de las muestras componente Inserto	113
5.4.4.3. Mapa de ubicación de las muestras componente Pieza estructural	114
5.4.4.4. Mapa de ubicación de las muestras componente Panel Delantero	114
5.4.4.5. Mapa de ubicación de las muestras componente Panel Trasero	115
5.4.4.6. Mapa de ubicación de las muestras componente Armazón Asidero	115
5.4.5. Curvas probeta recortada de los materiales de estudio	116
5.4.5.1. Parámetros del ensayo material recortado PPT16a	116
5.4.5.1.1. Componente Consola Central inyección 2004 (CC 2004)	116
5.4.5.1.2. Componente Consola Central inyección 2002 / test 2004 (CC 2002-04)	117
5.4.5.2. Parámetros del ensayo material recortado PPT16b	119
5.4.5.2.1. Componente Inserto inyección 2008 (INS 2008)	119
5.4.5.2.2. Componente Panel Delantero PD inyección 2013 (PD 2013)	120
5.4.5.2.3. Componente Panel Trasero PT inyección 2013 (PT 2013)	122
5.4.5.3. Parámetros del ensayo material recortado PPT30	123
5.4.5.3.1. Componente Pieza Estructural PE inyección 2004 (PE 2004)	123
5.4.5.3.2. Componente Pieza Estructural PE inyección 2003 / test 2013 (PE 2003-13)	125
5.4.5.4. Parámetros de ensayo material recortado ABS	126
5.4.5.4.1. Componente Inserto INS inyección 2008 (INS 2008)	126
5.4.5.4.2. Componente Inserto INS inyección 2012 (INS 2012)	128
5.4.5.4.3. Componente Armazón Asidero AA inyección 2012 (AA 2012)	129
5.4.5.5. Factores de Escala Máster para las familias PPT y ABS	131
5.5. Definición de las curvas de cálculo para los materiales de estudio	136
5.6. Resultados de los componentes con envejecimiento	140
5.7. Bibliografía	143

CAPÍTULO 6

VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA

6.1. Selección del tipo de test de validación. Modelo Asidero	144
---------------------------------------------------------------	-----

6.1.1. Dominio Modelo Asidero	144
6.1.2. Selección del tipo de ensayo	145
6.1.3. Selección temperatura y velocidad de deformación	146
6.1.4. Caso de carga	146
6.1.5. Descripción del criterio de validación	146
6.2. Ensayo físico	146
6.2.1. Descripción de las acciones externas y condiciones de enlace	146
6.2.2. Resultados	148
6.3. Modelos para simulación estructural	149
6.3.1. Descripción de los modelos MEF	149
6.3.2. Modelización del material	149
6.3.3. Modelo con elementos 3D sólidos (Tapa Sólidos)	149
6.3.3.1. Definición de malla	149
6.3.3.2. Condiciones de contorno	151
6.3.3.3. Modelo sin ley de endurecimiento (Tapa Sólidos Pendientes Positivas)	153
6.3.3.3.1. Valor solicitación	153
6.3.3.3.2. Deformada	154
6.3.3.3.3. Diagrama de tensiones equivalentes elementales de Von Mises, σ_{VM}	155
6.3.3.3.4. Diagrama de tensiones principales	155
6.3.3.4. Modelos con leyes de endurecimiento	159
6.3.3.5. Modelos con leyes de fricción	159
6.3.3.6. Modelos con contacto ley exponencial (Tapa Sólidos Soft)	159
6.3.3.7. Modelo caracterización usual en industria (Tapa Sólidos Ideal Industria)	159
6.3.3.8. Valor solicitación modelos Tapa Sólidos	161
6.3.4. Modelo con elementos tipo placa (Tapa Placas)	162
6.3.4.1. Definición de malla. Tiempo de cálculo	162
6.3.4.2. Condiciones de contorno	163
6.3.4.3. Indentador	165
6.3.4.4. Valor solicitación	164
6.3.4.5. Deformada. Mapa de corrimientos y	165
6.3.4.6. Tensiones equivalentes de Von Mises	165
6.3.5. Discusión de resultados	166
6.3.5.1. Modelos Tapa Sólidos	166

6.3.5.2. Modelo Tapa Placas	167
6.4. Uso de la metodología de caracterización (Etapa 1)	167
6.5. Bibliografía	169

CAPÍTULO 7

VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN CUASI-ESTÁTICA

7.1. Descripción del conjunto módulo panel puerta	170
7.1.1. Componentes del conjunto MPP	172
7.1.2. Relación de materiales. Espesores. Malla	172
7.1.3. Condiciones de enlace del modelo	174
7.2. Requerimientos estructurales. Cuaderno de cargas	175
7.3. Resultados	176
7.3.1. Resultados test experimental	176
7.3.2. Resultados modelos CAE	178
7.3.3. Correlación laboratorio virtual-laboratorio físico	180
7.4. Bibliografía	181

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES. FUTUROS DESARROLLOS

8.1. Conclusiones	182
8.2. Aportaciones	185
8.3. Futuros desarrollos	185

ANEXO A

ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIALES PLÁSTICOS

ANEXO B

FICHA CONTROL PARÁMETROS DE INYECCIÓN. COMPONENTE CONSOLA CENTRAL, MATERIAL PPT16a

ANEXO C

CODIFICACIÓN MUESTRAS EXTRAÍDAS DE PIEZAS INYECTADAS

FIGURAS

Capítulo 1

1

Figura 1.1. Ensayo carga puntual, con gravedad activada para contemplar el peso propio, del conjunto *defrost* de un panel de automóvil. Mapa de colores según nivel de deformación

Figura 1.2. Clasificación de las variables de influencia sobre la correlación test-simulación

Figura 1.3. Estructuración de la tesis doctoral

Capítulo 2

11

Figura 2.1. Curva típica de tensión-deformación de un material

Figura 2.2. Modelo elástico multilíneal de cálculo para material POM industrial

Figura 2.3. Ajuste de las constantes para el modelo constitutivo hiperelástico de un elastómero mediante curvas experimentales

Figura 2.4. Superficies de plasticidad para varios criterios

Figura 2.5. Ley de endurecimiento isotrópico de Von Mises

Figura 2.6. Curva tensión-deformación de un metal. Efecto Baushinger

Figura 2.7. Círculos de Mohr, ensayo uniaxial, cuando se alcanza el límite elástico σ_e

Figura 2.8. Superficie de plastificación para el criterio de Tresca-Guest. Las paredes laterales del prisma representan el límite de plastificación, y éstas se extienden hacia $\pm\infty$

Figura 2.9. Criterio de la tensión equivalente de Von Mises. Balance energético

Figura 2.10. Superficie de plastificación para el criterio de Von Mises. Las paredes laterales del cilindro representan el límite de plastificación, y éstas se extienden hacia $\pm\infty$

Figura 2.11. Superficie de plastificación para el criterio de Drucker-Prager D-P y de Mohr-Coulomb M-C. Las paredes laterales del cono D-P representan el límite de plastificación, y éstas se extienden de forma infinita

Capítulo 3

35

Figura 3.1. Curva elastoplástica isotrópica a 23°C para un material PP

Figura 3.2. Definición de curvas módulos sobre curva elastoplástica a 23°C para un material PP

Figura 3.3. Detalle en el origen de la curva de la figura anterior, material PP, Módulo 0,2% y Módulo en el Origen

Figura 3.4. Detalle en el origen de la curva elastoplástica para el material PP. Módulo secante a tracción

Figura 3.5. Modelo elastoplástico de cálculo (azul) seleccionando σ_Y del fabricante, para un material POM industrial

Figura 3.6. Corrección a valores verdaderos mediante formulación clásica. Ejemplo PP

Figura 3.7. Correcciones a partir de la σ_{max} de la curva de valores verdaderos usando el modelo de endurecimiento lineal (*Endurec1*) y el cuadrático (*Endurec2*). Material PP

Figura 3.8. Orientación de las fibras, capa superficial e intermedia. S. Glase, A. Wüst

Figura 3.9. Ficha industrial, material PP con un 15% de carga de talco

Figura 3.10. Curvas elastoplásticas a 23°C, PPT15, según dirección de inyección

Figura 3.11. Curvas a diferentes temperaturas, resina Nylon con 40% de refuerzo mineral

Figura 3.12. Módulo secante E_{TS} de un material ABS para varias temperaturas. Y: límite de fluencia

Figura 3.13. Curvas elastoplásticas a distintas velocidades de deformación, PP homopolímero con un 30% de fibra de vidrio

Figura 3.14. Módulo elástico según velocidad de deformación estimada, comportamiento viscoelástico, para un propileno-etileno copolímero con 17% de refuerzo mineral, Dow Plastics

Figura 3.15. Comparativa curvas isotérmicas de un ABS usando distintas técnicas de medición

Figura 3.16. Mapa de corrimientos (según colores) no despreciables de una viga en voladizo bajo niveles de carga altos. Modelo FEM

Figura 3.17. Mapa de tensiones equivalente de Von Mises sobre deformada (según colores) de una junta elastomérica de un panel de puerta para automoción. Configuraciones a lo largo del proceso de carga

Figura 3.18. Mapa de tensiones equivalentes de Von Mises de un ensamblaje de un clip. Condiciones cinemáticas de contacto clip-posicionador

Figura 3.19. Detalle de la creación de la superficie intermedia sobre CAD 3D, cilindro central con nervios

Figura 3.20. Malla conjunto Módulo Panel Puerta para automóvil con elementos placa, modelo global. Detalle de un clip del modelo (espesores definidos según mapa de colores)

Figura 3.21. Comparativa de la respuesta sobre muestra, mediante simulación, para predecir el efecto del coeficiente de fricción

Figura 3.22. Relación presión-cierre, contacto *soft* exponencial en Abaqus

Capítulo 4

79

Figura 4.1. Esquema implementación Metodología de caracterización cuasi-estática

Figura 4.2. Esquema propuesta Metodología de Caracterización Cuasi-estática

Figura 4.3. Esquema Factor de Escala Máster

Figura 4.4. Curva Ideal versus Curva Recortada primera muestra, material de estudio PPT16a

Figura 4.5. Curva Ideal versus Curva Ideal Reducida, material de estudio PPT16a

Figura 4.6. Determinación de σ_{yc} , material de estudio PPT16a

Figura 4.7. Comparativa Tramo lineal versus Curva Recortada, PPT16a

Figura 4.8. Corrección a valores verdaderos del Tramo Elastoplástico, PPT16a

Figura 4.9. Curva de cálculo estimada, corrección a valores positivos, PPT16a

Figura 4.10. Curva elastoplástica Positiva con valores de deformación plástica, para usar en código numérico. Material PPT16a

Figura 4.11. Curva elastoplástica con endurecimiento lineal. Material PPT16a

Figura 4.12. Curva con valores de deformación plástica, *Endurec1*. Material PPT16a

Figura 4.13. Curva elastoplástica con endurecimiento cuadrático. Material PPT16a

Figura 4.14. Curva con valores de deformación plástica, *Endurec2*. Material PPT16a

Capítulo 5

97

Figura 5.1. Dimensiones probetas a tracción tipos 1A y 1B. ISO 527-2:2012

Figura 5.2. Dimensiones probetas a tracción tipo 1BA y 1BB. ISO 527-2:2012

Figura 5.3. Curvas elastoplásticas material PPT16, probeta ideal. Curva convencional y curva verdadera corregida

Figura 5.4. Curvas elastoplásticas material PPT16b, probeta ideal. Curva media convencional (rojo) y curva media verdadera (azul)

Figura 5.5. Curvas elastoplásticas material PPT30, probeta ideal. Curva convencional y curva verdadera corregida

Figura 5.6. Curvas elastoplásticas material ABS. Curva convencional y curva verdadera corregida

Figura 5.7. Pieza Cuerpo de una Consola central

Figura 5.8. Pieza Inserto módulo panel puerta, inyección material PPT16b

Figura 5.9. Pieza estructural interna de un conjunto de consola central

Figura 5.10. Panel Delantero de un conjunto módulo puerta de un automóvil

Figura 5.11. Panel Trasero de un conjunto módulo puerta

Figura 5.12. Armazón asidero de un conjunto módulo puerta

Figura 5.13. Orientación del flujo en inyección, pieza Cuerpo Consola central

Figura 5.14. Esquema de tiempos de llenado (líneas) y distribución de presiones. Inserto

Figura 5.15. Líneas de unión (líneas de tigre), pieza Panel Delantero

Figura 5.16. Líneas de flujo, detalle zona de extracción de muestras. Pieza Estructural

Figura 5.17. Áreas de extracción de planchas para ensayo, pieza Cuerpo Consola central

Figura 5.18. Áreas de extracción de planchas para ensayo. Inserto

Figura 5.19. Mapa de ubicación de las muestras componente Pieza Estructural

Figura 5.20. Mapa de extracción de las muestras, componente Panel Delantero

Figura 5.21. Zonas de extracción de planchas para ensayo. Panel Posterior

Figura 5.22. Zona A marcada para el recorte, componente Armazón Asidero

Figura 5.23. Curvas material recortado PPT16a CC 2004. Curva media 5 zonas

Figura 5.24. Curvas material recortado PPT16a CC 2004. Curva media componente

Figura 5.25. Curvas probeta recortada PPT16a CC 2002-04. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.26. Curva media material recortado PPT16a CC 2002-04

Figura 5.27. Curvas material recortado PPT16b INS 2008. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.28. Curva media material recortado PPT16b INS 2008

Figura 5.29. Curvas material recortado PPT16b PD 2013. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.30. Curva media material recortado PPT16b PD 2013

Figura 5.31. Curvas material recortado PPT16b PT 2013. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.32. Curva material recortado PPT16b PT 2013. Trazo medio

Figura 5.33. Curvas material recortado PPT30 PE 2004. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.34. Curva material recortado PPT30 PE 2004. Trazo medio

Figura 5.35. Curvas material recortado PPT30 PE 2003-2013. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.36. Curva material recortado PPT30 PE 2003-13. Curva media

Figura 5.37. Curvas material recortado ABS INS 2008. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.38. Curva material recortado ABS INS 2008. Trazo medio

Figura 5.39. Curvas material recortado ABS INS 2012. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.40. Curva material recortado ABS INS 2012. Trazo medio

Figura 5.41. Curvas material recortado ABS AA 2012. Curvas medias 5 zonas

Figura 5.42. Curva material recortado ABS AA 2012. Trazo medio

Figura 5.43. Cuadro de acciones sobre curvas recortadas. Cálculo $FE_{Máster,i} (\%)$

Figura 5.44. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente CC 2004

Figura 5.45. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente INS 2008

Figura 5.46. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente PD 2013

Figura 5.47. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente PT 2013

Figura 5.48. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente PE 2004

Figura 5.49. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente INS 2008

Figura 5.50. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente INS 2012

Figura 5.51. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente AA 2012

Figura 5.52. Curvas de cálculo PPT16b. Detalle corrección zona endurecimiento

Figura 5.53. Curvas de cálculo PPT30. Detalle corrección zona endurecimiento

Figura 5.54. Curvas de cálculo ABS. Detalle corrección zona endurecimiento

Figura 5.55. Curvas de cálculo versus curva recortada media verdadera. Material PPT16b

Figura 5.56. Curvas de cálculo versus curva recortada media verdadera. Material PPT30

Figura 5.57. Curvas de cálculo versus curva recortada media verdadera. Material ABS

Capítulo 6

144

Figura 6.1. Pieza Tapa Asidero

Figura 6.2. Bancada de ensayo para la tapa Asidero

Figura 6.3. Pisador en posición para ensayo. Detalle de asentamiento sobre pieza

Figura 6.4. Respuesta vertical media versus fuerza aplicada, ensayo físico

Figura 6.5. Instante del ensayo físico

Figura 6.6. Modelo CAE Tapa Asidero, elementos sólidos

Figura 6.7. Modelo Tapa Asidero, elementos sólidos. Detalles de malla

Figura 6.8. Detalle de la distribución de elementos en el espesor general de pieza

Figura 6.9. Ensayo de caracterización de rigidez de la cartela a flexión. Punto 2

Figura 6.10. Ensayo de caracterización de rigidez de la cartela a flexión. Curvas promedio

Figura 6.11. Condiciones de enlace para la fijación 1. Rigidez de base según k_{FL1}

Figura 6.12. Condiciones de enlace para la fijación 2. Rigidez de base según k_{FL2}

Figura 6.13. Curva fuerza aplicada Tapa Sólidos Pendientes Positivas vs curva test físico

Figura 6.14. Mapa de corrimientos verticales en mm. Tapa Sólidos Pendientes Positivas

Figura 6.15. Tensiones elementales de Von Mises, MPa. Tapa Sólidos Pendientes Positivas

Figura 6.16. Detalle zona plastificación central y alas laterales (marcas transversales)

Figura 6.17. Diagrama de tensión principal máxima, en MPa, σI

Figura 6.18. Tensión principal máxima, en MPa, σI Detalle en sección más solicitada

Figura 6.19. Diagrama de tensión principal mínima σIII , en MPa

Figura 6.20. Tensión principal mínima σIII , en MPa. Detalle en sección más solicitada

Figura 6.21. Tensiones de Von Mises, en MPa, zonas de plastificación. Vista superior

Figura 6.22. Tensiones de Von Mises, en MPa, zonas de plastificación. Vista inferior

Figura 6.23. Tensiones de Von Mises (plastificación), MPa. Vista superior. Modelo Ideal Industria

Figura 6.24. Tensiones de Von Mises (plastificación), MPa. Vista inferior. Modelo Ideal Industria

Figura 6.25. Curva Fuerza-corrIMIENTO en y, varios modelos, vs curva test físico

Figura 6.26. Modelo Tapa Placas. Densidad de malla. Mapa de colores según espesor

Figura 6.27. Restricciones, modelo Tapa Placas

Figura 6.28. Elementos de contacto, zona interacción con el indentador, modelo Tapa Placas

Figura 6.29. Curva Fuerza-corrimiento en y, Tapa Placas vs curva test físico

Figura 6.30. Diagrama de deformaciones verticales, en mm. Modelo Tapa Placas

Figura 6.31. Diagrama de tensiones nodales equivalentes de Von Mises, en MPa. Tapa Placas

Capítulo 7

170

Figura 7.1. Vista anterior Módulo Panel Puerta, modelo CAE

Figura 7.2. Vista posterior Módulo Panel Puerta, modelo CAE

Figura 7.3. Vista posterior de la estructura metálica, soporte estructural del MPP, modelo CAE

Figura 7.4. Vista anterior y posterior Módulo Panel Puerta. Componentes

Figura 7.5. Vista anterior y posterior MPP. Espesores y asignación de materiales

Figura 7.6. Curva de cálculo, material acero

Figura 7.7. Restricciones del dominio de estudio

Figura 7.8. Definición de los ensayos de validación de Rigidez estática puntual

Figura 7.9. Módulo estructural para anclaje de la puerta

Figura 7.10. Aplicación de la fuerza mediante célula de carga, ensayo Rigidez estática puntual. Lectura del corrimiento en la dirección de aplicación de cargas. Punto 21

Figura 7.11. Gráfica de ensayo para el Punto 16, 23oC. Rigidez estática puntual

Figura 7.12. Diagramas de deformaciones y tensiones. Modelo Metodología. Varios puntos

Figura 7.13. Diagramas de deformaciones y tensiones. Modelo Metodología. Varios puntos

TABLAS

Capítulo 1	1
Tabla 1.1. Premisas claves para la nueva metodología	
Capítulo 3	35
Tabla 3.1. Valores mecánicos principales para un material PPT15, datos industriales	
Capítulo 5	97
Tabla 5.1. Caracterización mecánica del PPT16a, 23°C	
Tabla 5.2. Caracterización mecánica del PPT16b, 23°C	
Tabla 5.3. Caracterización mecánica del PPT30, 23°C	
Tabla 5.4. Caracterización mecánica del ABS, 23°C	
Tabla 5.5. Componentes de estudio según familia de materiales	
Tabla 5.6. Componentes adicionales para el estudio de envejecimiento natural	
Tabla 5.7. Factor de Escala Máster familia PPT	
Tabla 5.8. Factor de Escala Máster familia ABS	
Capítulo 6	144
Tabla 6.1. Estadístico de malla para el modelo Tapa Sólidos	
Tabla 6.2. Tiempos computacionales, modelo Soft versus modelo Pendientes Positivas	
Tabla 6.3. Ratios de calidad de malla impuestos en el software ANSA, modelo Tapa Placas	
Tabla 6.4. Modelo Tapa Placas. Estadístico del mallado. Tiempo de cálculo	
Capítulo 7	170
Tabla 7.1. Resultados CAE y test experimental. Rigidez estática puntual sobre MPP	

ABREVIATURAS PRINCIPALES

AA	Armazón Asidero
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AMFE	Análisis de Modos de Fallos y Efectos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computed-Aided Design</i> . Diseño asistido por ordenador
CAE	<i>Computed-Aided Engineering</i> . Ingeniería asistida por ordenador
CAM	<i>Computed-Aided Manufacturing</i> . Fabricación asistida por ordenador
CC	Cuerpo Consola
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i> . Fluidodinámica computacional
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> . Instituto Alemán de Normalización
DFA	<i>Design for Assembly</i> . Diseño para ensamblaje
DFM	<i>Design for manufacturing</i> . Diseño para fabricación
DMA	<i>Dynamic Mechanical Analysis</i>
DOE	<i>Design Of Experiments</i> . Diseño de experimentos
FA	<i>Functional Analysis</i> . Análisis Funcional
GF	<i>Glass Fiber</i>
HPDE	<i>High Density Polyethylene</i>
INS	Inserto
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método de los Elementos Finitos
PD	Panel delantero
PDA	<i>Product Data Management</i>
PDM	<i>Product Data System</i>
PE	Pieza estructural
POM	Polioximetileno

PP	Polipropileno
PPT16	Polipropileno con carga mineral de talco (16%)
PPT30	Polipropileno con carga mineral de talco (30%)
PT	Panel trasero
PVC	Policloruro de vinilo
QFD	<i>Quality Function Deyployment</i> . Despliegue de la función de calidad
QUAD	Elemento finito en forma cuadrada
TRIAD	Elemento finito en forma triangular
UV	Radiación ultravioleta
UNE-EN	Una Norma Española
VA	<i>Value Analysis</i> . Análisis de valor.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El primer capítulo sitúa la presente tesis, especificando la motivación tecnológica, el ámbito de aplicación, los objetivos y la novedad de la de la investigación. Finalmente se muestra la estructuración del documento, con una breve introducción de cada capítulo, para facilitar su lectura.

1.1. CONTEXTUALIZACIÓN Y MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

Este trabajo de investigación se basa en la necesidad de mejorar los resultados que se obtienen en simulación estática estructural de componentes o conjuntos en desarrollo industrial mediante el método de los elementos finitos, FEM (*Finite Element Method*).

Estos componentes o ensamblajes deben superar unos cuadernos de cargas que han sido ajustados, principalmente, por las expectativas del cliente. De esta forma se han alcanzados unos niveles elevados de exigencia, por lo que el diseño de un producto hasta su fabricación debe alimentarse de metodologías altamente efectivas frente a unos tiempos de desarrollo muy reducidos. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de

un conjunto *defrost* de un panel para automóvil, bajo exigencias estructurales de diseño: carga estática de 20 N, contemplando el peso del sistema [1].

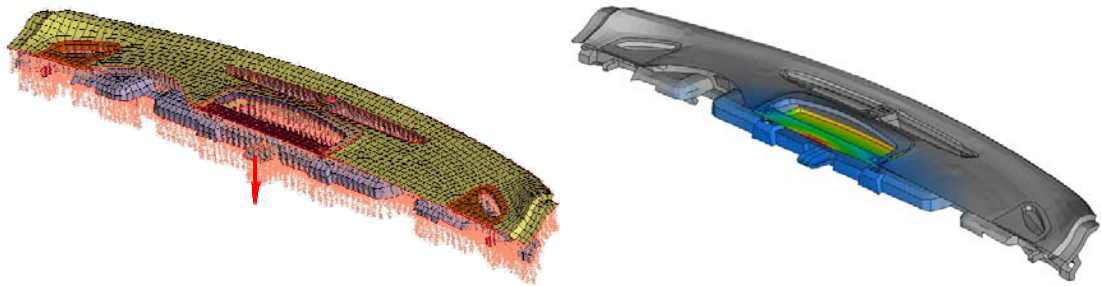


Figura 1.1. Ensayo de carga puntual, con gravedad activada para contemplar el peso propio, del conjunto *defrost* de un panel de automóvil. Mapa de colores según nivel de deformación

Hace un tiempo apareció en Europa el concepto de Ingeniería Concurrente o Simultánea, para hacer frente a la fuerte competitividad japonesa de los últimos años. Esta ingeniería (también llamada Integrada, Horizontal o Paralela), persigue la simultaneidad de todas las acciones sobre el producto y la conexión máxima entre cada una de las etapas que conforman el proceso de diseño, desarrollo y producción del mismo[2]. Esta metodología consigue adaptarse mucho mejor a las elevadas exigencias del mercado. Las herramientas CAD/CAE/CAM juegan un papel muy importante en este concepto de ingeniería, por lo que la simulación numérica (CAE, *Computed Aided Engineering*) resulta una herramienta muy eficaz a lo largo de las etapas del ciclo de un producto industrial.

En época donde las empresas de producto tecnológico deben regular el volumen de recursos propios para responder a los desequilibrios del mercado frente a las crisis, la subcontratación ha ido ganando protagonismo. Este proceso económico se efectúa con mayores exigencias, por lo que no solo el cliente es responsable directo del comportamiento funcional de su producto, si no que los proveedores llegan a compartir responsabilidades al máximo nivel. En estos casos el proveedor recibe carácter de *Full Supplier*, con la necesidad de incorporar competencias avanzadas en el diseño y desarrollo, mediante CAE. De esta forma se va extendiendo la simulación computacional basada en el método de los elementos finitos, más allá de las empresas multinacionales con grandes departamentos técnicos especializados.

La simulación basada en FEM debe presentar la mejor bondad posible en cuanto a resultados, con unos tiempos computacionalmente competitivos en industria. El analista debe conocer los modelos constitutivos implementados en los códigos numéricos, sus ventajas y sus limitaciones, para poder escoger la ecuación óptima en cada caso, en relación al coste de extracción de datos, tiempo computacional y bondad de valores. Cálculos que presenten tiempos de respuesta largos difícilmente podrán implementarse en el ejercicio diario industrial y, solo en algunos casos, podrán usarse como ejercicio de validación del diseño final. A su vez, modelos constitutivos que requieran, para la caracterización del material, ensayos poco habituales, difícilmente entraran en uso común y, en muchas ocasiones, resultarán desconocidos para la mayor parte de los analistas.

De ahí el planteamiento de una mejora en la estrategia de caracterización del material abordado en esta investigación, teniendo muy en cuenta el equilibrio bondad/coste en el ejercicio diario industrial.

Premisas para la nueva metodología
Mejora en la bondad de los resultados versus metodología actual extendida en la industria
Simplicidad
Tiempos computacionales suficientemente cortos

Tabla 1.1. Premisas claves para la nueva metodología

1.2. ALCANCE DE LA METODOLOGÍA

De entre todas las tipologías de simulación estructural, las estáticas son las que dan mayor respuesta al problema de exigencias mecánicas, en industria genérica. De entre todas éstas, la que tiene un papel relevante es la considerada no lineal, teniendo en cuenta grandes desplazamientos y modelos constitutivos de material no proporcionales. Sobre esta tipología de simulación se ha desarrollado el presente estudio.

La nueva estrategia de caracterización se desarrolla para materiales termoplásticos. En la industria es muy habitual usar materiales de matriz polimérica sin ningún tipo de refuerzo de fibra (corta o larga) o nanocargas: el alcance se limita a esta familia de materiales.

Una de las prácticas que debería extenderse es la de la realización de ejercicios de correlación entre los resultados obtenidos mediante simulación y los experimentales, con el fin de validar y optimizar el laboratorio virtual, a la vez que se asegura una buena praxis del uso del laboratorio físico. No debe olvidarse este último punto, pues existe una cierta tendencia a aceptar de forma incuestionable los valores de los test físicos, existiendo, en numerosos casos, cierto ruido en la respuesta.

Para abordar la nueva metodología, que debe mejorar la correlación test-simulación, es necesario tener en cuenta las dos formas de influencia sobre el resultado final: mediante variables relacionadas con la curva tensión-deformación y/o mediante variables relacionadas con el modelo estructural CAE.

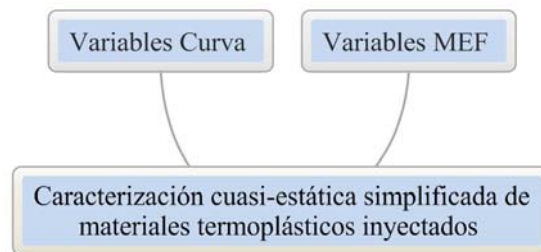


Figura 1.2. Clasificación de las variables de influencia sobre la correlación test-simulación

La mayor parte de las variables planteadas en esta investigación están relacionadas de forma directa con el material, pero no todas. Por ejemplo, el tipo de elemento seleccionado en una simulación estructural usualmente afecta al resultado obtenido, y no suele tener relación directa con el material. Sin embargo, en este trabajo se han agrupado todas las variables de interés bajo el concepto metodología de caracterización, cuando en realidad en industria, referente a simulación, se habla de caracterización a todo aquello relacionado con el material.

Así pues, para el presente estudio, una variable de influencia puede estar en relación directa con el test de tracción en máquina universal (ejemplo: velocidad de deformación), o con la manipulación de la curva obtenida en dicho test (ejemplo: corrección a valores verdaderos), o con el modelo de elementos finitos (ejemplo: grado del elemento).

La principal variable MEF es la ecuación constitutiva que se usa para establecer el comportamiento mecánico del material. El modelo no lineal por antonomasia es el elastoplástico por endurecimiento de Von Mises, creado para dar una excelente

respuesta al comportamiento de metales, pero puede introducir errores en su aplicación para materiales termoplásticos en comportamiento a fluencia. Sin embargo, actualmente en la industria se implementa este modelo, en combinación con las variables de influencia, dando resultados aceptables. En la presente tesis se examina la bondad de sus resultados en ejercicio industrial diario para estos materiales.

Así pues, no se contemplan los modelos para dar respuesta a elasticidad para materiales porosos, ni los modelos hiperelásticos, ni los viscoelásticos. De estas tres familias de modelos elásticos, la última es la que parece que no debería quedar fuera de este estudio, si se está tratando con termoplásticos. La razón es que los modelos constitutivos viscoelásticos presentan un nivel de uso mucho más complejo (mayor dificultad de obtención de las constantes constitutivas del material, y mayor tiempo computacional) y solo deberían usarse para modelos CAE no demasiado grandes (número no elevado de nodos) y con modelos constitutivos contrastados. Es posible que en un futuro estos modelos desplacen a los clásicos o probablemente cohabiten simultáneamente, en cuanto a su uso, cuando se disponga de mayor capacidad computacional y una comprensión de éstos más extendida. No obstante, nunca debe olvidarse la premisa de simplicidad de adquisición de los parámetros del material, fundamental en la industria.

Por lo que se refiere a comportamiento inelástico de los materiales en simulación estática se descartan, por las mismas razones, los modelos viscoelastoplásticos.

Se contemplan todas aquellas variables que juegan un papel importante en la respuesta (Variables Curva y Variables MEF), seleccionadas por su implementación suficientemente simple. Esta premisa debe respetarse siempre, limitando el alcance del presente estudio. De entre todas ellas, se destaca la variable Factor de Escala Máster. Esta variable, mediante un procedimiento previo a la implementación de la metodología (Etapa 0), permitirá a una empresa estimar el efecto medio de su proceso de inyección sobre el comportamiento del material de las piezas que fabrica.

1.3. OBJETIVOS

A continuación se presenta el objetivo principal de la investigación:

- Definir una metodología para una nueva estrategia de caracterización cuasi-estática en base a uno de los modelos constitutivo existente en los software FEM

del mercado. Esta nueva estrategia de caracterización debe ser óptima en cuanto a simplicidad de uso y con un grado de respuesta suficientemente correcto, para su uso cotidiano en industria. La aplicación de la metodología resulta particularizada al entorno de la empresa que realice su implementación.

Por lo que se refiere a los objetivos específicos:

- Situar la caracterización de materiales habitual utilizada en la industria para abordar problemas de no linealidad relacionadas con el material, para polímeros de uso común en la industria, como son los termoplásticos.
- Analizar las variables más significativas que modifican la respuesta mecánica del material, para su selección como parámetros a implementar dentro de la metodología de caracterización.
- Establecer el alcance y las limitaciones de la metodología presentada.
- Aplicar la metodología a un caso práctico, para su validación, mediante un primer nivel de complejidad, a través de un planteamiento híbrido de ensayo test-simulación. Finalizar con una etapa de verificación mediante la aplicación de un segundo caso existente real de industria, de mayor complejidad (segundo nivel).

1.4. NOVEDAD DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN

La investigación efectuada sitúa la nueva propuesta de caracterización en referencia al caso tratado (Faurecia Interior Systems Abrera). Esta tesis se establece como base para dicha nueva metodología de caracterización, especialmente por lo que se refiere al parámetro Factor de Escala Máster.

Estudios futuros complementarán dicha metodología mediante la introducción de algún nuevo parámetro, o mediante la modificación de alguno de ellos. Respecto a la variable Factor de Escala Máster, los valores presentados en este trabajo, válidos para Faurecia y referencia para otras empresas, podrán ajustarse en un futuro, mediante más componentes reales inyectados por la misma plataforma; una metodología es una entidad viva que puede y debe alimentarse a lo largo del tiempo.

Mediante nuevas validaciones de otras familias de materiales termoplásticos podrá lograrse el enfoque generalista, para la estimación del Factor de Escala Máster.

A través de esta nueva caracterización se cree que es posible aumentar el nivel de correlación entre simulación y ensayo en entorno industrial, respetando la simplicidad en la caracterización de materiales y tiempos de respuesta habituales en la industria, por lo que su aplicación implicará incrementar las prestaciones en términos de calidad, productividad y precio. En definitiva, competitividad.

1.5. ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Este documento se ha organizado en 8 bloques. A continuación se expone brevemente lo que puede hallarse en los restantes capítulos.

En el Capítulo 2 se profundiza en las ecuaciones constitutivas de material no proporcionales para simulación cuasi-estática estructural, con el fin de establecer la selección de la formulación constitutiva para la metodología presentada. La elección recae en la de Von Mises con endurecimiento isotrópico y regla de flujo asociada, por motivos de simplicidad y extensión de su uso.

Las variables influyentes sobre la respuesta del problema general elastoplástico que se plantea en industria se describen en el capítulo 3, estableciéndose el estado del arte para simulación cuasi-estática estructural. El trazo del capítulo resulta coherente con la clasificación de las variables en tipo Curva y tipo MEF. Se está en disposición de seleccionar las variables para ser introducidas en la metodología. Sin embargo, para algunas de ellas será necesario complementar su estudio mediante un ejercicio de sensibilidad, que se llevará a cabo mediante el Modelo Asidero presentado posteriormente, en el capítulo 6.

En el Capítulo 4, núcleo de la tesis, se establece la propuesta de la nueva metodología de caracterización. Se destacan 2 etapas para la implementación de esta metodología en industria. Una Etapa 0, previa al uso de la metodología, y una segunda llamada Etapa 1, donde se aborda propiamente el uso de dicha metodología de caracterización. Con el fin de validar la bondad de la propuesta planteada, en los siguientes capítulos (5, 6 y 7) se presenta un caso práctico. Sin embargo, en el mismo Capítulo 4 se anticipa un primer ejemplo curva, utilizando una de las gráficas iniciales obtenidas de probeta recortada (capítulo 5), para ayudar a la comprensión de la propuesta. En este ejemplo tan solo se

hace hincapié en la aplicación de las variables de manipulación de la curva ideal, especialmente por lo que se refiere a la definición del límite de fluencia de cálculo.

En el Capítulo 5 se inicia el caso práctico de aplicación de la propuesta, para la empresa *Faurecia Interior Systems* plataforma Abrera. Este capítulo recoge las acciones que se llevan a cabo para la obtención de datos de 4 materiales de estudio a partir de 10 componentes, seleccionados en coherencia con la diversidad de situaciones que pueden aparecer en la industria. Estos componentes permiten definir el Factor de Escala Máster, para la familia PPT y la ABS. A su vez, 3 de estos materiales forman parte del Modelo Panel Puerta y del Modelo Tapa Asidero, usados para la validación y posterior verificación de la presente metodología. Finalmente remarcar que 2 de los 10 componentes utilizados para la extracción de datos se han tratado, en este capítulo, de forma adicional para el estudio del parámetro envejecimiento natural. Se es consciente de la inviabilidad de uso de esta variable en la metodología, por lo que el contemplar este parámetro en la investigación responde a una previa evaluación de su efecto, para establecer una futura línea de investigación que exponga, si es posible y de forma simplificada, la introducción de esta variable.

En el siguiente capítulo se efectúa el ejercicio híbrido test-simulación mediante el Modelo Tapa Asidero, que corresponde al componente tapa de un asidero de una puerta de automóvil. La correlación establece la bondad de uso de la metodología propuesta.

Una vez validada la metodología, se realiza de un ejercicio de verificación mediante un modelo de mayor complejidad, representativo de industria. De esta forma se verifica, en el Capítulo 7, la bondad final de uso de la propuesta presentada en ejercicio habitual.

Finalmente en el Capítulo 8 se exponen las conclusiones principales obtenidas de esta tesis doctoral siguiendo los objetivos propuestos en este mismo capítulo. Además, se incluyen las aportaciones logradas por el presente estudio. El último punto hace referencia a posibles futuras líneas de investigación.

A modo de resumen, la estructuración del estudio puede verse en la siguiente figura.

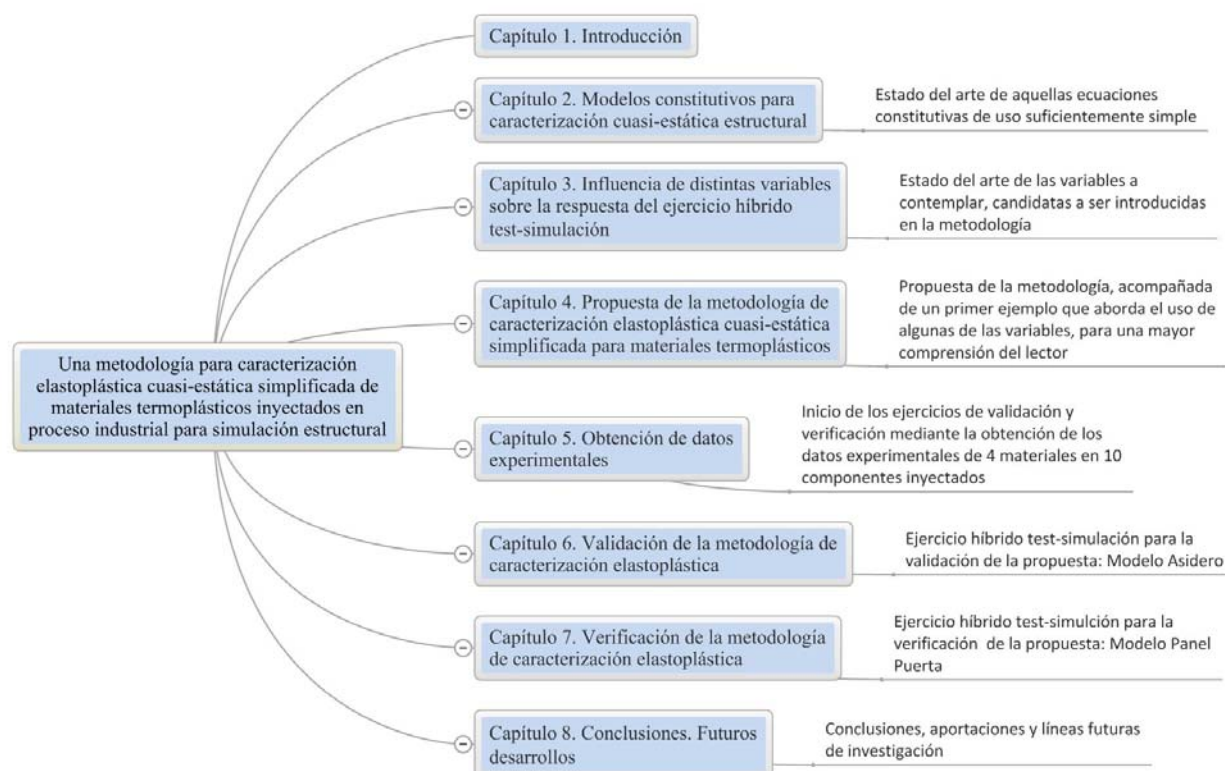


Figura 1.3. Estructuración de la tesis doctoral

1.6. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. M. Puigoriol, “Defrost LHD. Finish panel deflection. V1, first loop.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2006.
- [2] J. M. Puigoriol, “Exigències estructurals. Desenvolupament de producte mitjançant Enginyeria Concurrent,” *Enginyeria Industrial IQS*, no. 2, pp. 8–13, 2005.

CAPÍTULO 2

MODELOS CONSTITUTIVOS PARA CARACTERIZACIÓN CUASI-ESTÁTICA ESTRUCTURAL

Se anuncian los distintos modelos constitutivos para dar respuesta al comportamiento elastoplástico para materiales termoplásticos en situación cuasi-estática. Se selecciona el criterio de plastificación, la regla de flujo y la regla de endurecimiento para la ecuación constitutiva base de la nueva metodología de caracterización.

2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS POLÍMEROS

Los plásticos se encuentran sometidos a diferentes estados de carga en sus distintas aplicaciones, por lo que la selección del material adecuado para cada una de ellas se basa, entre otras consideraciones, en sus propiedades mecánicas. Éstas dependen fundamentalmente de su composición, estructura y condiciones de procesado. Asimismo, existen otros factores que influyen en las mismas y son principalmente el tiempo (velocidad de aplicación de los esfuerzos) y la temperatura. A lo largo del

presente estudio se expondrán las variables más importantes a considerar y más influyentes sobre la respuesta mecánica, para una correcta caracterización elastoplástica.

Debido al carácter viscoelástico de los plásticos, el comportamiento de estos materiales cuando se les aplica un esfuerzo a velocidad elevada no puede extrapolarse, de forma directa, para aplicaciones en las que la carga se aplica durante periodos prolongados de tiempo. Los ensayos a largo plazo simulan estas situaciones en el laboratorio. En dichos ensayos se estudia el comportamiento que presenta un material bajo un esfuerzo o una deformación constante en función del tiempo, y son especialmente adecuados en el diseño de piezas que tienen que sufrir esfuerzos sostenidos.

Por otra parte, la respuesta de un material polimérico puede ser muy diferente dependiendo del tipo de esfuerzo al que se vea sometido. En la caracterización de un material para una aplicación determinada es conveniente estudiar su comportamiento ante el tipo de esfuerzo aplicado y no es válido, en muchos casos, extrapolar directamente los resultados de un tipo de ensayo a otro.

Dentro de los ensayos a corto plazo, en los que no se tiene en cuenta el tiempo de aplicación del esfuerzo, destacan los ensayos a tracción, flexión, compresión e impacto.

Por lo que se refiere a ensayos a largo plazo, los más relevantes son los ensayos de fluencia (*creep*) y los de relajación de esfuerzos.

Los ensayos de fluencia consisten en aplicar una carga fija a una muestra y estudiar la deformación resultante en función del tiempo. En los ensayos de relajación de esfuerzos se aplica una deformación pre-escrita a una muestra, y se investiga la variación de la carga requerida para mantener la deformación en función del tiempo.

En la presente tesis se aborda la caracterización elastoplástica cuasi-estática, por lo que el test de esfuerzo uniaxial a tracción resulta el más adecuado para implementar este tipo de caracterización. Se muestra, en la Figura 2.1, una curva genérica, especificando aquellos puntos destacables. A lo largo del estudio se reflexiona sobre la dificultad de obtener, de forma fácil y unívoca, alguno de estos parámetros, especialmente para materiales poliméricos, así como la tendencia de los distintos tramos en que puede dividirse la respuesta.

El test típico realizado en la máquina universal de ensayos presenta una curva esfuerzo-deformación, a corto plazo, en el que la fuerza aplicada varía de forma constante. Esta

curva elastoplástica representa el comportamiento de un material genérico frente a una acción longitudinal (uniaxial).

Los datos obtenidos de la máquina universal de ensayos establecen la relación fuerza-desplazamiento. Estos datos se transforman en tensión versus deformación.

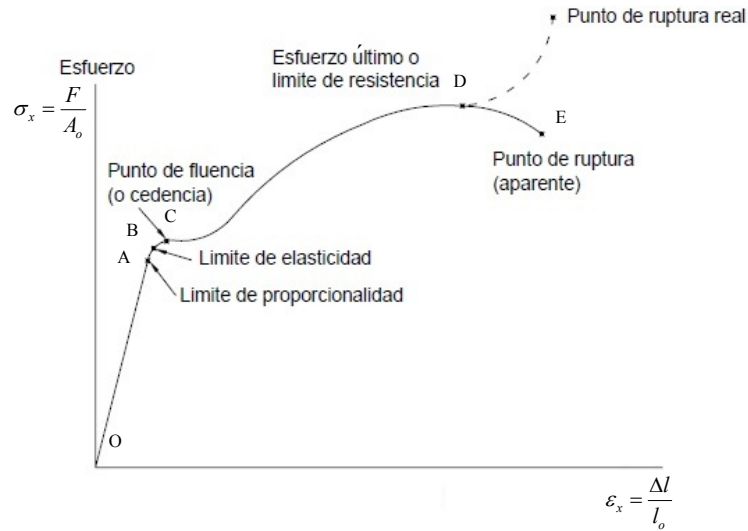


Figura 2.1. Curva típica de tensión-deformación de un material

La gráfica tensión-deformación se puede dividir en dos tramos. El primero es lineal y muestra una proporcionalidad entre esfuerzo y deformación. El punto A se conoce como límite de proporcionalidad σ_p .

La tensión de ingeniería nominal (o también tensión de ingeniería, o tensión convencional), habitualmente usada, se escribe como:

$$\bar{\sigma}_{xyz} = \begin{bmatrix} \frac{F}{A_o} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.1

donde F es el esfuerzo de tracción aplicado en la dirección x y A_o la sección transversal inicial de la probeta. El tensor $\bar{\sigma}_{xyz}$ representa el estado tensional de cualquier punto de la probeta.

La deformación longitudinal nominal o deformación longitudinal ε_x (en %) puede calcularse según la fórmula:

$$\varepsilon_x(\%) = \frac{l - l_o}{l_o} \times 100$$

Ecuación 2.2

siendo l_o la longitud inicial y l la longitud entre marcas efectuadas en la muestra. Sin embargo, es usual mostrar este valor de forma adimensional (mm/mm).

La expresión del tensor deformación pura resulta:

$$\varepsilon_{xyz} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.3

Aunque en el tramo AB ya no hay proporcionalidad entre esfuerzo y deformación, el material todavía se comporta como elástico, es decir, la deformación desaparecería totalmente si cesara el esfuerzo.

A partir del punto B el comportamiento deja de ser elástico. Las deformaciones que tienen lugar por encima del límite elástico (punto B, σ_e) dejan de ser recuperables, debido a que estas deformaciones son consecuencia del deslizamiento de unas moléculas respecto de otras. Las moléculas que se han desplazado no pueden volver a su posición original, por lo que la deformación es irreversible. En este caso el material ya no se comporta como un cuerpo elástico si no que adquiere carácter elastoplástico.

En el segundo tramo, a partir del punto C (límite de fluencia, σ_y) la curva tiende hacia la horizontalidad, como consecuencia de que el material se hace dúctil y fluye a poco que varíe el esfuerzo aplicado. Después de dicho punto, puede ocurrir que para seguir deformando el material se deba aplicar un esfuerzo algo mayor, debido a que el material puede haber sufrido un ligero endurecimiento. Este comportamiento se conoce como endurecimiento por fluencia o etapa de endurecimiento. Finalmente cuando la curva vuelve a presentar una pendiente con tendencia horizontal, el material entra en la última zona de fluencia.

El punto final E corresponde al instante en que el material rompe con un esfuerzo de rotura σ_r , que recibe el nombre de resistencia a la rotura, y una deformación longitudinal unitaria ε_r denominada deformación de rotura.

La tenacidad se puede estimar como el área que queda por debajo de la curva. Representa el trabajo total necesario para romper el material. Cuanta mayor cantidad de energía pueda absorber un material experimentando grandes deformaciones, más tenaz será. El termino fragilidad hace referencia al concepto opuesto.

2.2. MODELOS ELÁSTICOS

Los modelos elásticos se caracterizan por seguir el mismo camino sobre la curva de carga y descarga. Las relaciones entre tensión y deformación son invertibles y reversibles, por lo que en elasticidad no hay disipación de energía. Existe siempre una relación entre tensión y deformación, a temperatura especificada.

Se distinguen distintos tipos de comportamiento elástico[1]:

1. Materiales elásticos lineales y multilineales. La relación entre tensiones y deformaciones es lineal. El modelo clásico es el de Cauchy.
2. Materiales hipoelásticos. La relación entre fuerza y desplazamiento no es proporcional, y están basados, generalmente, en datos experimentales.
3. Materiales hiperelásticos. La relación entre tensión y deformación tampoco es lineal. Sus ecuaciones se trazan a partir del concepto energía de deformación. El modelo clásico es el de Green, basado en una función de densidad de potencial. Este modelo contiene el modelo elástico de Cauchy.

2.2.1. MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO LINEAL

Una parte de los problemas técnicos planteados en la industria pueden abordarse mediante modelos lineales de comportamiento del material, debido a que es habitual desarrollar piezas que presenten un estado tensional suficientemente bajo. Se escoge como el límite elástico σ_e como tensión última de diseño. Se desea que a lo largo de la vida útil del producto no presente comportamiento plástico significativo en ninguna zona, con el fin de evitar deformaciones remanentes al retirar la sollicitación. Este objetivo ha gobernado buena parte del desarrollo industrial a lo largo de la historia.

Para materiales poliméricos así como para otros materiales, resulta difícil distinguir entre límite de proporcionalidad, límite elástico y límite de fluencia. Se define una sola tensión en esta zona, la de fluencia, como el punto representativo de cambio de comportamiento. Suele adoptarse como aquel valor de la tensión que, al descargar la pieza, provoca una deformación unitaria residual de 0,002 (2 por mil)[2]. Se acepta realizar la caracterización bajo este límite σ_y mediante linealidad.

Sobre el test de tracción, situación de carga uniaxial en que se basa este trabajo, para el comportamiento debajo del límite de fluencia (confundido con el límite elástico), se cumple la ley constitutiva uniaxial de Hooke:

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$$

Ecuación 2.4

donde σ_x es la tensión normal de ingeniería en el eje longitudinal x , E el módulo de Young o de elasticidad longitudinal (tramo OA, Figura 2.1) y ε_x la deformación longitudinal unitaria presentada por la probeta.

El comportamiento del material queda definido usualmente con solo dos constantes: módulo elástico E y coeficiente de Poisson ν . Este coeficiente se define mediante la relación de la deformación longitudinal en la dirección x de aplicación del esfuerzo versus las transversales y y z :

$$\varepsilon_{xyz} = \begin{bmatrix} \frac{F}{A_o \cdot E} & 0 & 0 \\ 0 & -\nu \cdot \frac{F}{A_o \cdot E} & 0 \\ 0 & 0 & -\nu \cdot \frac{F}{A_o \cdot E} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.5

La principal problemática de este modelo es que no puede dar respuesta de forma correcta para valores de tensión-deformación por encima del límite de fluencia.

Si la simulación presenta niveles de tensión altos, debe analizarse la bondad de los resultados obtenidos. Si el modelo muestra amplias zonas de tensiones por encima del límite de fluencia o secciones con un tanto por ciento de puntos con valores superiores,

la simulación no debe ser aceptada como válida. Las deformaciones que se presentan en todo el modelo pueden verse afectadas por un exceso de rigidez, a la vez que el mapa de tensiones resulta falseado presentando valores más altos que los reales.

Comentar finalmente que si se retira la carga el modelo no presenta deformaciones remanentes, sea cual sea el nivel de carga contemplado.

2.2.2. MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO LINEAL MULTIPENDIENTE [3]

Representa una mejora del modelo anterior ya que permite seguir la curva elastoplástica mediante pendientes definidas entre dos puntos. Si se requiere mayor precisión, se añaden datos de la curva obtenida en el test de tracción.

La información puede contemplarse como dos pendientes definidas para el caso bilineal (o especificando los puntos inicial y final de cada tramo), o mediante varias pendientes, denominada caracterización elástica multipendiente.

La curva que se presenta como ejemplo ha sido extraída de un material POM industrial.

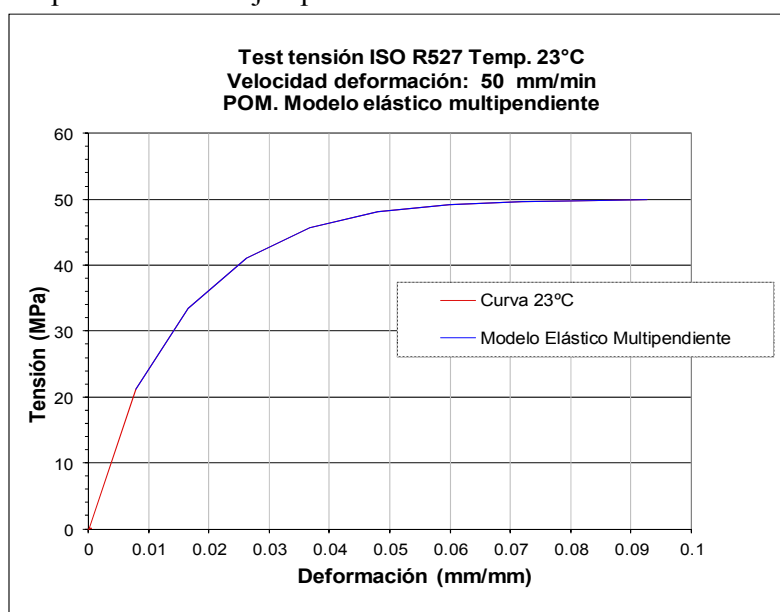


Figura 2.2. Modelo elástico multilíneal de cálculo para material POM industrial [4]

Respecto al comportamiento en la zona elastoplástica, los valores de tensión quedan ajustados por una curva bien trazada, pero el modelo constitutivo está formulado bajo los principios clásicos de la teoría de elasticidad y no de plasticidad. El comportamiento describe una respuesta conservativa por lo que no se ajusta a la realidad elastoplástica, que es dependiente del camino de carga. En consecuencia, los mapas de distribución de

tensiones no son correctos. Una muestra de este error se obtiene retirando las fuerzas sobre la estructura, recuperando el 100% de la deformación (completamente elástico).

Si el nivel de cargas es moderadamente alto se producen deformaciones significativas, por lo que el modelo empieza a fallar. La curva implementada sigue la ideal, pero el modelo constitutivo no contempla grandes deformaciones.

2.2.3. MODELO CONSTITUTIVO HIPOELÁSTICO [5–7]

Por lo que se refiere a las ecuaciones constitutivas hipoelásticas, existe cierta arbitrariedad con la que pueden ser establecidas.

Este modelo constitutivo suele plantearse a nivel incremental de la siguiente forma:

$$d\sigma = f(d\varepsilon, \sigma)$$

Ecuación 2.6

2.2.4. MODELO CONSTITUTIVO HIPERELÁSTICO [8]

Son modelos utilizados generalmente en el ámbito de grandes deformaciones. Los distintos coeficientes de la ecuación constitutiva (modelo Ogden, modelo polinomial, Blatz-Ko, Mooney-Rivlin, etc.) deben ajustarse experimentalmente para cada material en el rango de utilización [9], [10]. Se muestra, en la siguiente figura, un ajuste según formulación Ogden, del modelo hiperelástico de una junta elastomérica, mediante (software Abaqus)[11].

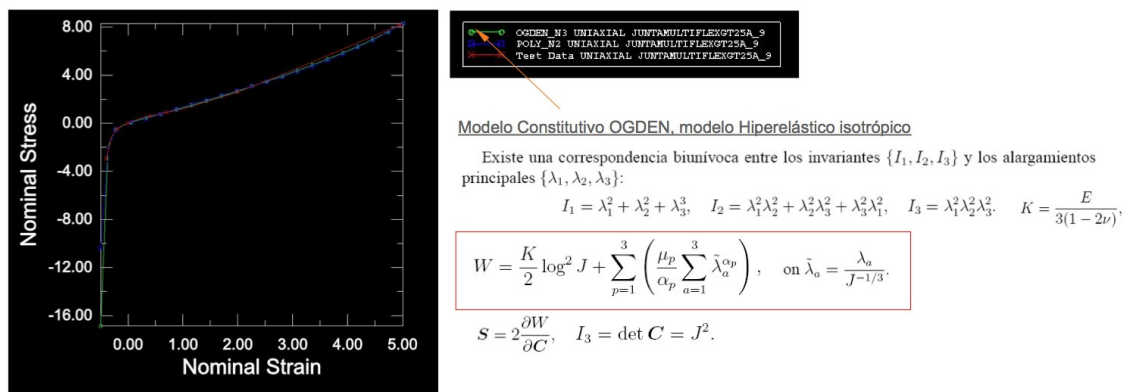


Figura 2.3. Ajuste de las constantes para el modelo constitutivo hiperelástico de un elastómero mediante curvas experimentales. *

* Coeficientes de Ogden no mostrados según criterios de confidencialidad

2.2.5. PRAXIS INDUSTRIAL DE LOS MODELOS ELÁSTICOS PARA SIMULACIÓN ESTÁTICA. DESCARTE PARA LA NUEVA METODOLOGÍA

En lo referente a análisis elásticos lineales, actualmente este tipo de cálculo suele utilizarse en etapas tempranas de desarrollo, para ir trazando tendencias a lo largo de la evolución del diseño. Resulta atractivo por su fácil implementación. Sin embargo, para análisis donde se requieran resultados más precisos y frente a problemáticas estáticas no lineales, es necesario ir más allá mediante un planteamiento elastoplástico del problema. Se descarta el uso de este modelo como base constitutiva de la presente propuesta de metodología debido a esta limitación.

El modelo elástico multipendiente no suele tener un uso extendido en industria debido a que no es capaz de dar respuesta, de forma correcta, al estado de plastificación. Otra desventaja importante en este tipo de modelo es la necesidad de resolución mediante métodos numéricos no lineales, por lo que se pierde toda la rapidez computacional del modelo lineal. Para conjuntos con un alto número de nodos, el tiempo computacional se dispara. Se desestima por su respuesta frente a situaciones que conllevan un cierto nivel de plasticidad.

En referencia al modelo hiperelástico, su principal *handicap* es la dificultad de obtención de las constantes, que deben hallarse mediante varios ensayos. No resulta válido disponer solo de resultados del ensayo de tracción, si no que debe acompañarse de ensayos de compresión para un ajuste matemático bidireccional correcto. Se descarta también como modelo para la presente metodología, por motivos de poca simplicidad.

Para las ecuaciones constitutivas hipoelásticas, como se ha comentado anteriormente existe cierta arbitrariedad con la que pueden ser definidas, por lo que no resultan apropiadas cuando se desea implementar una metodología de caracterización.

Finalmente remarcar que todos los modelos elásticos no permiten realizar la etapa de descarga para evaluar el nivel de deformación plástica remanente. Estos modelos presentan distribuciones de tensiones erróneas en situaciones de carga significativa.

2.3. MODELOS ELÁSTOPLÁSTICOS [12], [13]

Modelos usados para describir el comportamiento de grandes desplazamientos, contemplando tanto el tramo lineal como el no-lineal debido a la fluencia. La relación establecida entre tensiones y deformaciones se caracteriza por ser parcialmente irreversible y depender del camino de carga.

Existen dos tipos de enfoque para llevar a cabo cálculos elastoplásticos: la teoría deformacional y la incremental. En la primera se trabaja con la hipótesis que existen relaciones finitas entre las componentes de tensión y de deformación, mientras que en la segunda se afirma que dichas relaciones sólo existen a nivel diferencial, de modo que la deformación elastoplástica final se hace depender del camino seguido a lo largo del proceso de carga. Esta segunda teoría presenta ventajas desde el punto de vista físico y operativo, por lo que el presente trabajo se ciñe a ella.

Para pequeños corrimientos, estos modelos contemplan el modelo constitutivo elástico lineal presentado anteriormente:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

Ecuación 2.7

En esta zona lineal el módulo tangente $E_T = d\sigma/d\varepsilon$ coincide con el módulo elástico del material. Una vez superada la zona lineal y para deformaciones moderadas, el módulo tangente empieza a decrecer. Una forma de modelar este comportamiento es mediante un nuevo tramo lineal con un valor reducido de la pendiente.

En esta zona elastoplástica la deformación total (bajo hipótesis que los corrimientos son pequeños y que no existe deformación térmica ni viscosa) puede suponerse como la suma de una componente elástica ε_e y otra plástica ε_p :

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p$$

Ecuación 2.8

A nivel diferencial es posible definir tres módulos: Módulo Elástico E , Módulo Tangente E_T y el Módulo Plástico E_p , donde:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_e}$$

Ecuación 2.9

$$E_T = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Ecuación 2.10

$$E_p = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p}$$

Ecuación 2.11

$$\frac{1}{E_p} = \frac{1}{E_T} - \frac{1}{E}$$

Ecuación 2.12

La relación entre el incremento de tensión y el incremento de deformación puede escribirse en función del Módulo Elástico y el Módulo Plástico, de la siguiente forma:

$$d\sigma = \left(E - \frac{E^2}{E + E_p} \right) \cdot d\varepsilon$$

Ecuación 2.13

Esta expresión es válida durante el proceso de deformación plástica. Durante la fase elástica de la deformación así como durante la descarga solo queda la componente elástica:

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon$$

Ecuación 2.14

A continuación se presentan 3 conceptos asociados con la teoría de la plasticidad, necesarios para definir el comportamiento elastoplástico.

2.3.1. CRITERIO DE PLASTIFICACIÓN O DE FLUENCIA

El criterio de plastificación especifica a qué nivel de tensiones empieza a producirse el fenómeno de la plastificación (deformación irreversible).

Estableciéndose la tensión equivalente como parámetro representativo del estado tensional del punto de estudio del material (tensión equivalente según el criterio de plastificación considerado),

$$\sigma_{equiv} = f\left(\overset{=}{\sigma}\right)$$

Ecuación 2.15

la teoría de plastificación resulta actuante cuando dicha tensión equivalente iguala o supera el límite de fluencia σ_y . En este caso de condiciones inminentes:

$$f\left(\bar{\sigma}\right)=\sigma_y(k)$$

Ecuación 2.16

el punto de estudio empezará a presentar deformaciones plásticas. k representa el trabajo asociado al comportamiento plástico, parámetro de endurecimiento.

Los criterios de plasticidad pueden representarse de forma gráfica para una comprensión global del comportamiento. El sistema de coordenadas resulta ser el de tensiones y direcciones principales 1, 2 y 3. Si en el espacio graficado, el punto de estudio de un material definido por el tensor de tensiones principales se sitúa dentro de la superficie o piel de fluencia, el material presenta un comportamiento elástico, mientras que si está sobre la misma superficie empieza a presentarse la plastificación.

En la siguiente figura se representan superficies de plasticidad de varios criterios (Von Mises con superficie cilíndrica, Tresca con hexagonal), para su comparación.

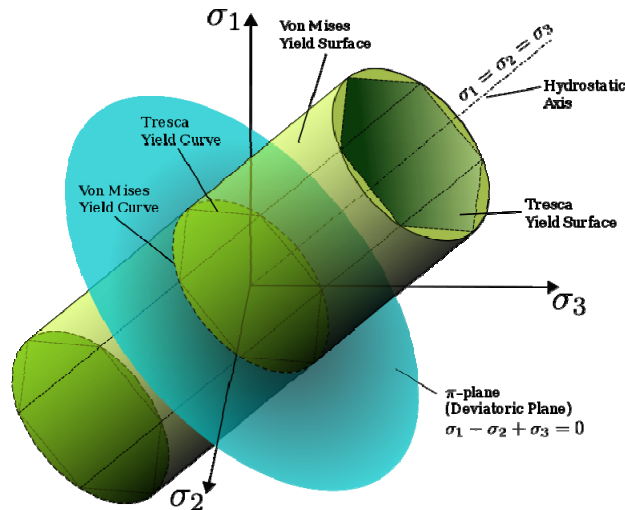


Figura 2.4. Superficies de plasticidad para varios criterios

El eje hidroestático representa aquellos estados tensionales con valores principales idénticos. Si se contempla un estado tensional de un punto en situación hidroestática con valores de tensión muy elevada, tanto el criterio de Von Mises como el de Tresca indican que el punto presenta comportamiento perfectamente elástico (el punto está lo más alejado posible de contactar con las superficies), mientras que en la realidad el

punto se encuentra en estado de rotura; ambas concluyen de forma errónea a este tipo de comportamiento.

2.3.2. REGLA DE FLUJO

La regla de flujo determina la dirección del comportamiento plástico, es decir, define la relación entre los incrementos de deformación plástica, el estado actual de tensión y los incrementos de tensión durante el proceso de plastificación. Analíticamente se expresa como:

$$d\bar{\epsilon}^p = \lambda_p \cdot \frac{d\bar{\psi}}{d\sigma}$$

Ecuación 2.17

donde λ_p es el multiplicador plástico o factor de proporcionalidad y Ψ es la función potencial plástico, cuyo gradiente determina la dirección de plastificación.

Habitualmente se asume que la función Ψ es la propia función de plastificación, por lo que la regla de flujo se denomina asociada, y las deformaciones plásticas suceden en la dirección normal a la superficie de plastificación. Para el tipo no-asociado, se supone que el incremento de deformación plástica es perpendicular a la superficie que define el potencial plástico [14].

2.3.3. REGLA DE ENDURECIMIENTO

La regla de endurecimiento describe las modificaciones que sufre la superficie de plastificación con las deformaciones plásticas, con el fin que las condiciones para plastificación subsecuente puedan ser establecidas. En definitiva, define como progresa la plastificación.

Se destacan dos modelos de endurecimiento: el isotrópico y el cinemático.

En el caso de endurecimiento isotrópico, la superficie resulta centrada respecto a su generatriz ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$) y se expande de igual forma en todos los puntos conforme se desarrolla el comportamiento plástico. La superficie de fluencia aumenta de tamaño sin desplazarse.

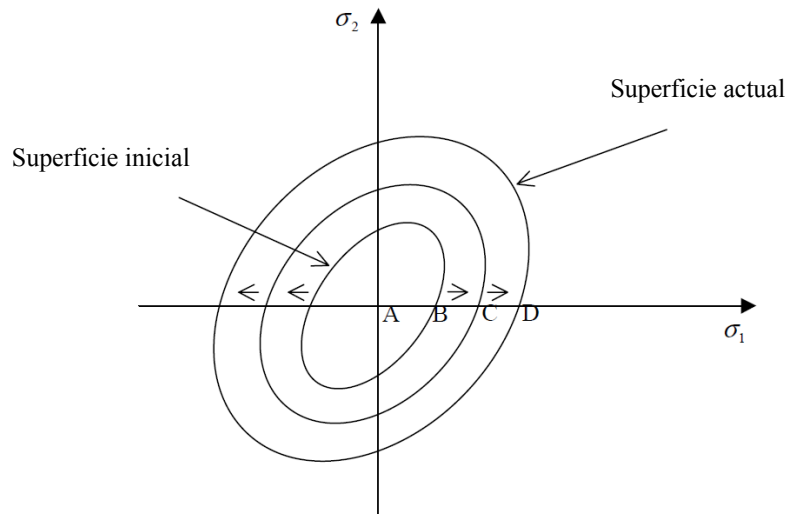


Figura 2.5. Ley de endurecimiento isotrópico de Von Mises

En el caso de endurecimiento cinemático se contempla el siguiente fenómeno: en algunos materiales experimentalmente es posible observar que la deformación plástica aumenta el límite elástico en la dirección de la sollicitación, disminuyéndolo en la dirección contraria a ésta. Este fenómeno es conocido como efecto Baushinger. Esto provoca un desplazamiento de la superficie de fluencia sin cambiar el tamaño.

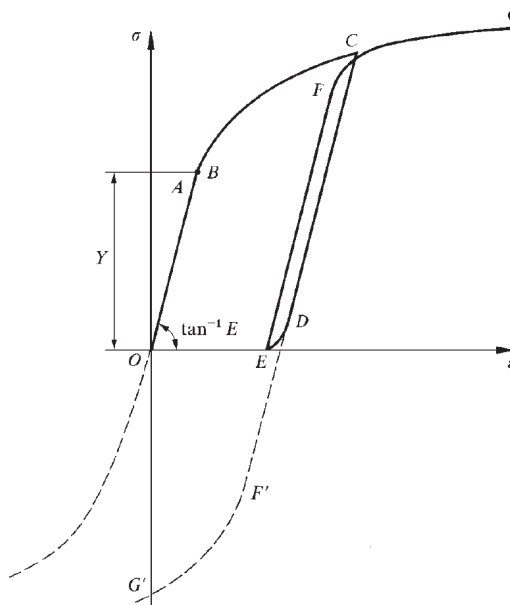


Figura 2.6. Curva tensión-deformación de un metal. Efecto Baushinger [12]

En la figura anterior, una vez superado el punto de fluencia A , el material presenta endurecimiento hasta el punto C , donde una vez eliminada la carga, el material recupera siguiendo una pendiente CD próxima al módulo elástico E . En el caso de continuar la

descarga a compresión, el camino seguido es el DF' , donde el nuevo límite de fluencia F' es apreciablemente inferior, en valor, al del punto C , que se suele confundir con F , nuevo límite de fluencia a tracción: disminución del límite de fluencia cuando se invierte el sentido de carga.

2.3.4. CRITERIOS DE PLASTIFICACIÓN PARA POLÍMEROS. SELECCIÓN PARA LA NUEVA METODOLOGÍA

La elección del criterio de plastificación para establecer el modelo constitutivo de cálculo es uno de los puntos más importantes para minimizar la desviación de la respuesta entre código numérico y test físico.

A lo largo de los años han ido apareciendo distintos criterios de plastificación. Dos de los primeros más relevantes, el de Tresca-Guest (1872) y el de Von Mises (1913-1934), se trazaron para dar respuesta al comportamiento mecánico de metales, centrándose en la componente de cizalladura, para explicar la tan marcada entrada en régimen plástico en estos materiales.

Ambos modelos, si bien son criterios ampliamente usados, presentan cierto error en aquellos casos donde pueda darse un estado hidrostático (caso donde las tensiones principales son iguales o muy cercanas, $\sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III}$). Aun así, siguen utilizándose comúnmente en la actualidad mediante el método de los elementos finitos, y se han extendido a una amplia variedad de materiales, incluido los polímeros.

Para un comportamiento más exacto de la respuesta en la fase de fluencia de un material polimérico, es necesario que el criterio de plastificación sea sensible también a dicho estado tensional hidrostático [15], [16], además de ser válido frente al efecto cortante. Para dar respuesta a esta necesidad surgieron varias teorías clásicas, destacándose las iniciales de Mohr-Coulomb (1900) y la lineal de Drucker-Prager (1952).

En los códigos numéricos de nivel alto pueden hallarse otras teorías presentadas a lo largo de los últimos 40 años, algunas de ellas evoluciones de las clásicas, tales como el criterio de Raghava et ál., el de Drucker-Prager extendido lineal, el de Drucker-Prager extendido cuadrático o el modelo de cavitación [17–19].

Dean et ál en el 2006 realizaron un estudio para ver la respuesta en la caracterización de materiales semi-cristalinos a impacto, a partir de los criterios de plastificación de Von Mises, de Drucker-Prager en la versión lineal y del modelo de cavitación, desarrollado por el *National Physical Laboratory* (NPL) [20]. Este estudio presenta la

posibilidad de estimar una caracterización a altas velocidades de deformación (necesarias para el comportamiento a impacto) mediante curvas obtenidas de forma cuasi-estática y a velocidades medias.

El criterio de cavitación parte del modelo de Drucker-Prager para incluir el efecto del fenómeno de cavitación [21], [22]. En algunos materiales poliméricos se presenta la nucleación de cavidades a nivel microscópico debido al estado tensional, potenciando, de forma local, la componente de cizalladura entre cavidades. Para el caso de polímeros semi-cristalinos, tales como el polipropileno PP a temperatura ambiente, las cavidades se ubican en la región amorfa entre cristalinas.

El efecto de la cavitación tiene una influencia directa en el comportamiento del polímero a compresión y a cizalladura, en comparación con el que presenta a tracción. Consecuentemente, es necesario para el uso de este criterio, obtener datos mediante ensayos de dos tipos: tracción y compresión, o tracción y cizalladura, siendo estos segundos test no tan habituales en la industria.

Del estudio de Dean et ál se concluye que el modelo de cavitación propuesto es el más preciso cuando existe una componente significativa hidroestática en el tensor tensión. Sin embargo, tanto el modelo Drucker-Prager como el criterio de cavitación requieren de segundos ensayos para obtener los datos del material.

Usualmente en ingeniería de producto, las piezas fabricadas con polímeros suelen tener limitado el espesor a valores pequeños debido al mismo proceso de fabricación, por lo que se minimiza la posibilidad de que algún tensor tensión presente estado triaxial hidroestático significativo. Consecuentemente, la elección del criterio de Von Mises para piezas inyectadas de plástico parece suficientemente adecuada para una metodología de caracterización simplificada, partiendo de la premisa de agilizar al máximo la caracterización, por lo que se refiere a facilidad de uso (obtención de los datos de los materiales).

A continuación se describen varios criterios de plastificación [23], [24]. En base a lo anteriormente comentado, se hace hincapié en aquellos más simples que pueden implementarse tan solo con los valores obtenidos mediante el test de tracción realizado en la máquina universal de ensayos. Se añade, de forma adicional, el criterio lineal de Drucker-Prager, como modelo representativo de la familia que contempla la componente hidroestática del tensor tensión.

2.3.4.1. Criterio de plastificación de Tresca-Guest

Conjuntamente con el criterio de Von Mises, representa uno de los criterios más ampliamente utilizado. Tresca-Guest (1872) propone, en su criterio proyectado para respuesta en metales, que la plastificación en un punto de un material, para un estado de tensión arbitrario, comienza cuando la tensión tangencial máxima alcanza un valor igual al presentado en el ensayo de tracción uniaxial, con el mismo material, cuando éste llega a la tensión última. Esta tensión es la del límite elástico.

La tensión tangencial máxima en el ensayo a tracción, cuando alcanza el estado límite es, tal como puede deducirse de los círculos de Mohr para cualquier punto de la muestra:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_e}{2}$$

Ecuación 2.18

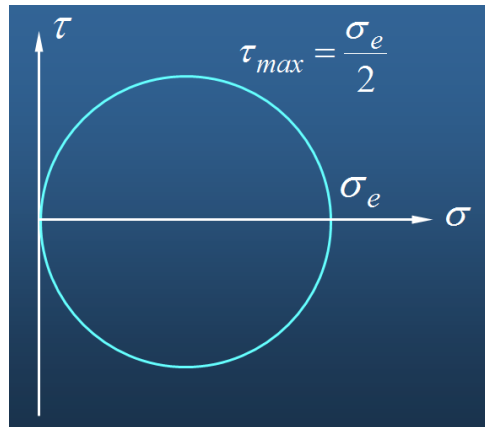


Figura 2.7. Círculos de Mohr, ensayo uniaxial, cuando se alcanza el límite elástico σ_e

El criterio puede expresarse mediante la comparativa del parámetro tensión tangencial máxima, utilizando las tensiones principales ordenadas, $\sigma_I > \sigma_{II} > \sigma_{III}$. La condición inminente de plastificación sucede cuando:

$$\frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} = k = \tau_{\max} = \frac{\sigma_e}{2}$$

Ecuación 2.19

La superficie de plastificación se representa, en el espacio de tensiones principales, como un prisma hexagonal de directriz infinita (Figura 2.8).

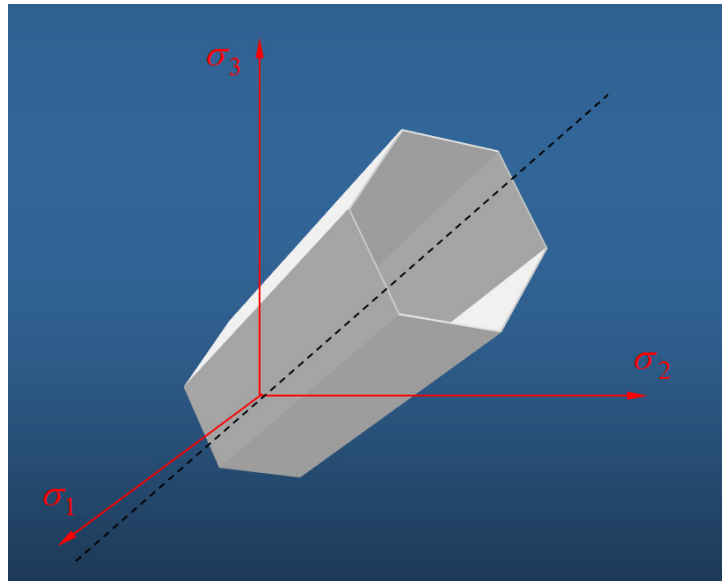


Figura 2.8. Superficie de plastificación para el criterio de Tresca-Guest. Las paredes laterales del prisma representan el límite de plastificación, y éstas se extienden hacia $\pm\infty$

2.3.4.2. Criterio de plastificación de Von Mises

Von Mises (1913), Hencky (1924) y Nadai (1934) realizaron la propuesta del criterio conocido como de la energía de distorsión de Von Mises o de Von Mises, también de aplicación a materiales metálicos. El estado de plastificación en un punto de un material, para un estado de tensión arbitrario, empieza cuando la energía de distorsión por unidad de volumen en un entorno del punto de estudio es igual a la energía de distorsión absorbida, por unidad de volumen, cuando el material alcanza la tensión límite en el ensayo a tracción.

Este criterio aísla la energía asociada a la distorsión, despreciando la energía de deformación que conlleva cambio de volumen (asociada al tensor tensión esférico u octaédrico).

Toda matriz tensional puede descomponerse en dos matrices con carácter físico: tensor esférico y tensor desviador.

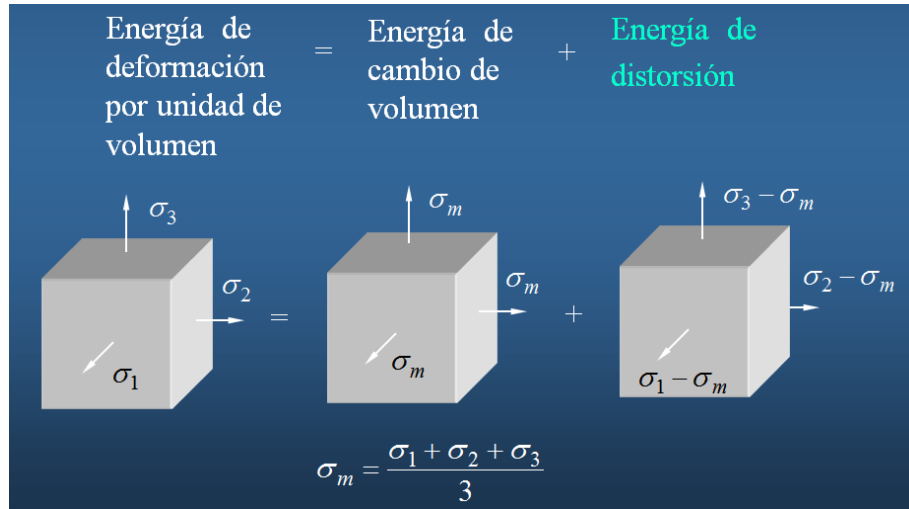


Figura 2.9. Criterio de la tensión equivalente de Von Mises. Balance energético

La energía total de deformación se expresa, respecto a las direcciones principales, como:

$$W = W_v + W_D = \frac{1}{2 \cdot E} \cdot (\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_{III}^2 - 2 \cdot \nu \cdot (\sigma_I \cdot \sigma_{II} + \sigma_I \cdot \sigma_{III} + \sigma_{II} \cdot \sigma_{III}))$$

Ecuación 2.20

La energía debido al cambio de volumen es:

$$W_v = \frac{(\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})^2}{6 \cdot E} \cdot (1 - 2 \cdot \nu)$$

Ecuación 2.21

por lo que la energía por unidad de volumen asociada al cambio de forma puede obtenerse restando:

$$W_D = W - W_v = \frac{1 + \nu}{6 \cdot E} \cdot [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]$$

Ecuación 2.22

La energía de distorsión para el ensayo a tracción simple, cuando alcanza el estado límite (tensión elástica) es:

$$W_D = \frac{1+\nu}{3 \cdot E} \cdot \sigma_e^2$$

Ecuación 2.23

El criterio mediante la comparativa del parámetro de Von Mises, en condiciones inminentes de plastificación, sucede cuando:

$$\frac{1+\nu}{6 \cdot E} \cdot [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2] = \frac{1+\nu}{3 \cdot E} \cdot \sigma_e^2$$

Ecuación 2.24

Otra forma de expresar la superficie de plastificación es la siguiente:

$$f = \sqrt{J_2} = \kappa = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 2.25

siendo J_2 el segundo invariante del tensor desviador.

La tensión equivalente de Von Mises se define como:

$$\sigma_{equiv}^{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]} = \sqrt{3 \cdot J_2}$$

Ecuación 2.26

La superficie de plastificación resulta un cilindro, en el espacio de las tensiones principales, de radio $\sigma_{equiv}^{VM} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_e$, según la directriz orientada en la dirección de la tensión hidroestática σ_m , tensión definida en la Figura 2.9.

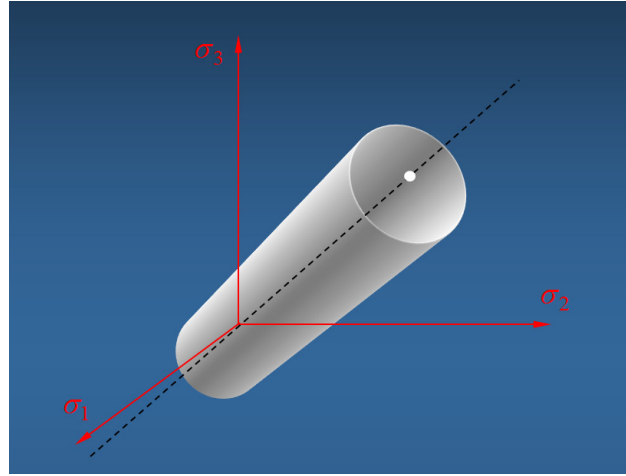


Figura 2.10. Superficie de plastificación para el criterio de Von Mises. Las paredes laterales del cilindro representan el límite de plastificación, y éstas se extienden hacia $\pm\infty$

2.3.4.3. Criterio de plastificación lineal de Drucker-Prager [25]

Como se ha comentado anteriormente, el comportamiento plástico de los polímeros es sensible a la componente hidroestática del tensor tensión. Se estableció como una generalización del criterio de Mohr-Coulomb (que a su vez era una extensión del criterio de Tresca incluyendo una dependencia con la tensión hidroestática) para sólidos (Drucker and Prager 1952).

El criterio se define mediante la condición:

$$\sqrt{J_2} = \lambda \cdot I_1 + \kappa$$

Ecuación 2.27

donde λ y κ son constantes del material e I_1 es el primer invariante del tensor tensión (traza). Los parámetros del material pueden hallarse mediante los test tracción y cortante, tracción y compresión o mediante el test triaxial representando los resultados en el espacio I_1 - $J_2^{1/2}$. Alternativamente, los parámetros pueden obtenerse del test de compresión triaxial, expresados en términos del ángulo de fricción interno ϕ , y de la cohesión c [26], [27]:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \phi)}$$

Ecuación 2.28

$$\kappa = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \phi)}$$

Ecuación 2.29

La ecuación 2.27 representa, en el espacio de las componentes principales del tensor tensión, un cono circular con generatriz $\sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III}$ cuando $\lambda > 0$. La fórmula muestra que este criterio es una extensión de von Mises en el caso que $\lambda = 0$; el cono se transforma en un cilindro, cortando en círculo en el plano π ($\sigma_I + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$).

En la siguiente imagen se muestra que la superficie cónica D-P queda circunscrita en la pirámide hexagonal de la teoría de Mohr-Coulomb M-C.

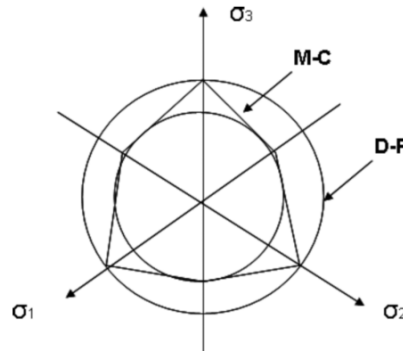


Figura 2.11. Superficie de plastificación para el criterio de Drucker-Prager D-P y de Mohr-Coulomb M-C. Las paredes laterales del cono D-P representan el límite de plastificación, y éstas se extienden de forma infinita

2.3.5. SELECCIÓN DE LA REGLA DE FLUJO

Se escoge la regla de flujo asociada, por ser la que usa Abaqus para los modelos clásicos de plasticidad en metales [28].

2.3.6. SELECCIÓN DE LA REGLA DE ENDURECIMIENTO

Los materiales plásticos suelen responder de forma correcta al tipo de endurecimiento isotrópico, mientras que para metales como el caso del aluminio y del acero, su comportamiento se ajusta mejor seleccionando reglas cinemáticas.

2.4. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Oller, “Dinámica no-lineal.” CIMNE, International Center for Numerical Methods in Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya UPC, Barcelona, 2002.
- [2] S. Torrano and D. Herreo, “Apuntes de Elasticidad y Resistencia de Materiales,” Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2011.
- [3] “ANSYS Structural Analysis Guide, release 12.0.” Ansys, Inc., USA, 2011.
- [4] Celanese, “Ticona Engineering Polymers. Material data sheet.” 2010.
- [5] C. Lázaro, “Ecuaciones constitutivas,” in *Introducción a la Mecánica de Sólidos*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.
- [6] Z. Mróz, “On hypoelasticity and plasticity approaches to constitutive modelling of inelastic behaviour of soils,” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 4, no. 1, pp. 45–55, 1980.
- [7] J. H. Yin, J. Graham, F. Saadat, and F. Azizi, “Constitutive modelling of soil behaviour using three modulus hypoelasticity. Proceeding of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 13–18 August 1989,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 28, no. 1, pp. 143–147, Jan. 1991.
- [8] GEMM-GMC, “Modelos Hiperelásticos. Lección 3. Curso de Máster-Biomecánica y Mecanobiología de tejidos blandos.” Group of Structural Mechanics and Material Modeling, 2000.
- [9] L. Crocker and B. Duncan, “Measurement methods for obtaining volumetric coefficients for hyperelastic modelling of flexible adhesives,” no. 3. NPL Report CMMT (A) 286, Teddington, 2001.
- [10] M. Sasso, G. Palmieri, G. Chiappini, and D. Amodio, “Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods,” *Polymer Testing*, vol. 27, no. 8, pp. 995–1004, Dec. 2008.
- [11] J. M. Puigoriol, “Junta de estanqueidad perimetral, tramo superior. Análisis hiperelástico.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2008.
- [12] J. Chakrabarty, *Theory of Plasticity*, 3rd. Edit. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006.
- [13] X. Ayneto, “El Método de los elementos finitos. Curso avanzado.” ST Mecánica Aplicada, S.L., Parc Tecnològic del Vallès, Cerdanyola, 1997.
- [14] V. A. Lubarda, S. Mastilovic, and J. Knap, “Some comments on plasticity

- postulates and non-associative flow rules,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 38, no. 3, pp. 247–258, Mar. 1996.
- [15] E. T. J. Klompen, “Mechanical properties of solid polymers. Constitutive modelling of long and short term behaviour,” Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2005.
- [16] R. M. Caddell, R. Raghava, and A. G. Atkins, “A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers,” *Journal of Materials Science*, vol. 8, pp. 1641–1646, 1973.
- [17] R. Raghava, R. M. Caddell, and G. S. Y. Yeh, “The macroscopic yield behaviour of polymers,” *Journal of Materials Science*, vol. 8, no. 2, pp. 225–232, Feb. 1973.
- [18] “ANSYS Theory Reference.” Ansys, Inc., USA, 2011.
- [19] “Abaqus Theory Manual.” Abaqus, Inc., USA, 2012.
- [20] G. D. Dean and L. E. Crocker, “Prediction of the impact performance of plastics using finite element methods.” NPL Report, Measurement Good Practice Guide No. 87, Teddington.
- [21] A. Lazzeri and C. B. Bucknall, “Dilatational bands in rubber-toughened polymers,” *Journal of Materials Science*, vol. 28, pp. 6799–6808, 1993.
- [22] A. L. Gurson, “Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile media,” *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 99, no. 1, pp. 2–15, 1977.
- [23] J. M. Puigoriol, “Apuntes de Elasticidad y Resistencia de Materiales.” Departamento de Ingeniería Industrial. IQS School of Engineering. URL, Abrera, 2000.
- [24] L. Ortiz Berrocal, *Elasticidad*, 3.^a ed. Madrid: McGraw-Hill, 1998.
- [25] L. R. Alejano and A. Bobet, “Drucker–Prager Criterion,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 45, no. 6, pp. 995–999, Jul. 2012.
- [26] L. B. Colmenares and M. D. Zoback, “A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks,” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 39, pp. 695–729, 2002.
- [27] X. Yi, P. P. Valkó, and J. E. Russell, “Effect of rock strength criterion on the predicted onset of sand production,” *International Journal of Geomechanics*, vol. 5, no. 1, pp. 66–73, 2005.
- [28] “ABAQUS Analysis User’s Manual, release 6.8. Volumen III: Materials.” Abaqus Inc., USA, 2008.

CAPÍTULO 3

INFLUENCIA DE DISTINTAS VARIABLES SOBRE LA RESPUESTA DEL EJERCICIO HÍBRIDO TEST-SIMULACIÓN

Se presentan los distintos parámetros a definir para alimentar el modelo constitutivo, que afectan a la definición de la curva tensión-deformación obtenida mediante test en máquina universal. Estas variables influyen en ambas partes de la curva isotérmica, tanto la elástica, como la de fluencia y de endurecimiento. También se recoge la influencia de aquellos parámetros asociados al modelo numérico MEF, para lograr minimizar el *gap* entre test-simulación.

3.1. VARIABLES EN RELACIÓN A LA CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN, VARIABLES CURVA

Se describen tanto aquellas variables a tener en cuenta para la definición, mediante test, de la curva tensión-deformación, como aquellas correcciones que pueden implementarse

sobre la curva para mejorar el trazo obtenido.

3.1.1. LÍMITE DE FLUENCIA σ_Y

Para materiales poliméricos resulta difícil establecer el límite de fluencia, debido a que la curvatura en la gráfica tensión-deformación se da ya desde el principio, por lo que no es elemental trazar el tramo de linealidad. Este parámetro es de gran importancia para ajustar la respuesta computacional. De hecho, esta tensión es necesaria para cualquier ecuación constitutiva.

Los siguientes puntos se acompañan de un ejemplo extraído de la actualidad en industria (algunos de los datos no se muestran según criterios de confidencialidad). En concreto se ha seleccionado un Polipropileno copolímero PP. El trazo hace referencia a los valores según probeta flujo transversal, datos a temperatura ambiente.

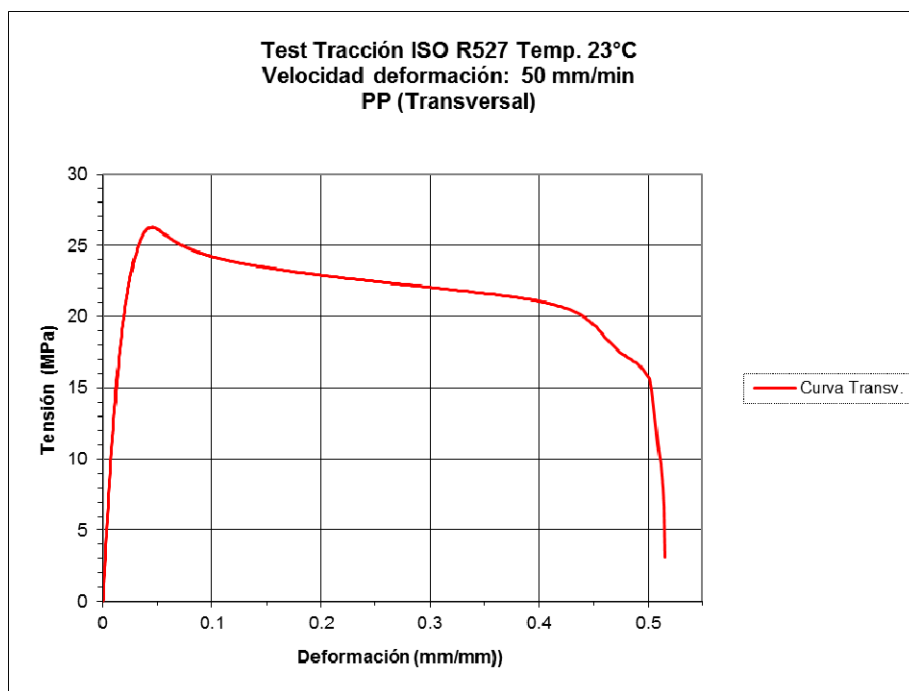


Figura 3.1. Curva elastoplástica isotrópica a 23°C para un material PP [1]

Para hallar el límite de fluencia (confundido con el elástico) puede combinarse la respuesta experimental en carga (instante en la que la curva elastoplástica adquiere una tendencia horizontal; control de los valores de fuerza) con la respuesta en descarga (límite en el que aparece deformación residual, propio del umbral elástico). Aun así, contemplando los datos obtenidos en experimentación, no existe, en algunos casos, una clara definición, especialmente para los polímeros con marcado carácter dúctil.

Algunos investigadores sugieren realizar un método mediante ensayos de carga y descarga para detectar el mínimo valor de la deformación inelástica. Este procedimiento consiste en solicitar varias probetas a tracción para diferentes niveles de deformación plástica, controlando las deformaciones residuales en cada ensayo. La deformación remanente es medida después de un cierto tiempo de recuperación, siendo este tiempo al menos igual al de proceso de carga. Se grafican las curvas obtenidas mediante la deformación residual versus el nivel de deformación del ensayo impuesto conjuntamente con las gráficas de tensión-deformación. Esta metodología permite definir el punto de fluencia escogiendo el mínimo valor de la deformación inelástica. Sin embargo, este método conlleva una duración muy larga de los ensayos [2–4].

Como resultado de lo expuesto, la tensión de fluencia se intenta escoger como aquella tensión contigua a la etapa de endurecimiento [5–7].

Remarcar de nuevo la importancia de esta selección, pues también queda condicionada la pendiente a tracción de cálculo E_T que contemplará el modelo elástico o elastoplástico que se asocie.

Otra posible forma de calcular el límite de fluencia, una vez obtenida la curva, es mediante el concepto de Módulo secante $E_{T,0.002}$ al 0.2% de deformación, concepto válido para metales pero no siempre extrapolable a polímeros.

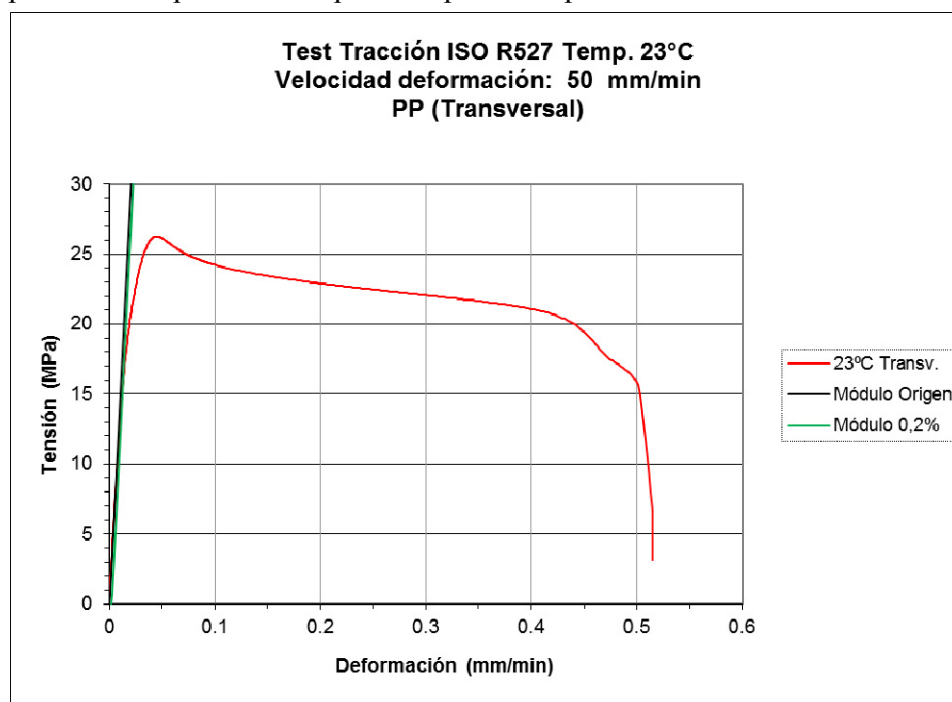


Figura 3.2. Definición de curvas módulos sobre curva elastoplástica a 23°C para un material PP

Para el PP ejemplo (ver Figura 3.2 y 3.3), a 23°C presenta una curva creciente en todos los puntos, por lo que dificulta la determinación de este límite.

Si se aplica el concepto de módulo secante al 0,2% (curva paralela al módulo de Young en el origen y emplazada al 0,2% de deformación, obteniéndose por intersección el límite), se halla un límite de fluencia bastante bajo, $\sigma_y=14,4$ MPa. En realidad el límite experimental de fluencia sitúa el valor a 26 MPa. La metodología del límite al 0,2% presenta un error importante sobre este ejemplo.

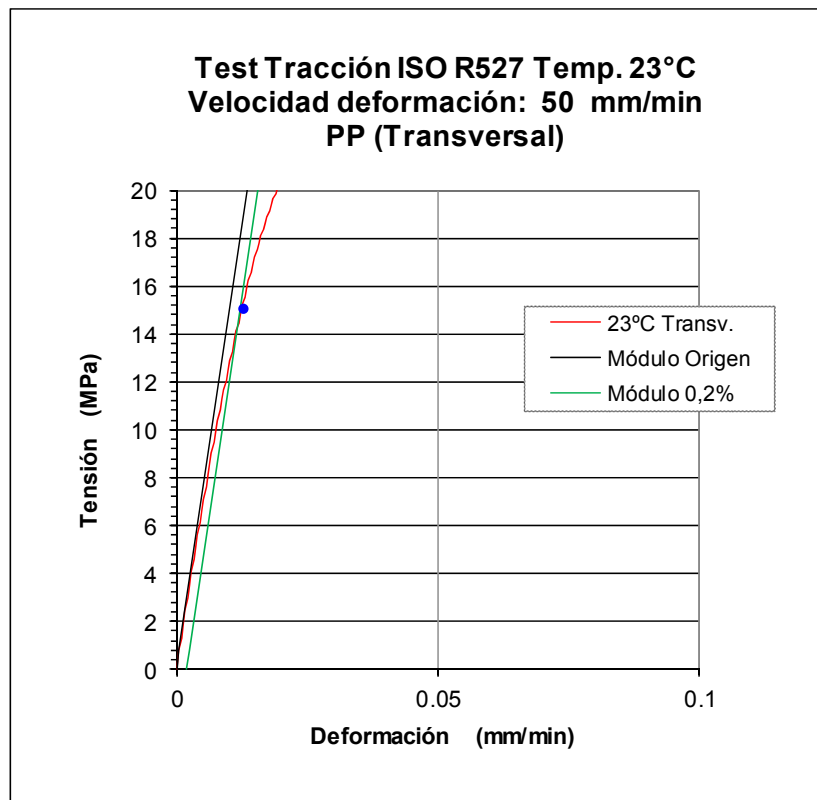


Figura 3.3. Detalle en el origen de la curva de la figura anterior, material PP, Módulo 0,2% y Módulo en el Origen

La normativa ISO, en su reciente versión 2012 [8], ha introducido un anexo destinado a este aspecto debido a su importancia. Destacan los siguientes elementos para la determinación del esfuerzo de fluencia:

- Los materiales plásticos presentan comportamiento de esfuerzo/deformación muy variados. La zona de fluencia puede ser un pico estrecho o una zona amplia plana.
- La determinación de la deformación en el punto de fluencia, como condición

necesaria, implica la identificación del punto más elevado de los datos en la región de fluencia.

c. El punto seleccionado debe tener sentido físico. El ruido de la señal (tanto electrónica como mecánica), puede provocar una elección de puntos inadecuados.

d. El punto seleccionado como tensión de fluencia debe permitir decisiones de diseño significativas. Por ejemplo, para un material que presenta el tramo de fluencia plano, el límite útil de diseño debería estar más cerca del inicio que del centro de la zona plana.

La determinación de la tensión de fluencia puede realizarse, según la normativa, a partir de datos digitales mediante diferentes métodos:

1. Comparación punto a punto para seleccionar un valor máximo. Resulta un procedimiento simple, pero necesita comprobaciones adicionales para evitar la elección de un ruido asociado a los valores máximos de manera errónea. Suele implicar un intervalo móvil de evaluación, cuya amplitud dependerá del sistema.

2. Método de la pendiente. Método que implica una mayor cantidad de cálculo, pero factible gracias a la potencia computacional actual. El criterio de la pendiente implica también un intervalo móvil de evaluación en que se calcula la pendiente de regresión de la curva esfuerzo/deformación. Este método tiene un efecto de suavizado y filtrado, reduciendo la influencia del ruido. Adicionalmente, se debe definir un criterio para el que la pendiente sea indicativa de hallazgo:

- 2.1. Punto central del intervalo de evaluación para el que la pendiente se hace negativa por primera vez.

- 2.2. Punto central del intervalo de evaluación para el que la pendiente alcance algún valor límite positivo por primera vez. La normativa define, como una primera propuesta de borrador, el siguiente criterio, aplicado al punto central de un intervalo móvil, para el que la pendiente se hace igual o inferior al valor del esfuerzo σ en este punto:

$$\varepsilon_y = \varepsilon \left| \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \leq \sigma \right|$$

Ecuación 3.1

2.3. La ventaja de tal criterio sería identificar únicamente aquellas deformaciones en el punto de fluencia que están próximas al primer cambio de la pendiente mayor de la curva tensión/deformación. Sin embargo los valores de deformación en el punto de fluencia serían inferiores que con los métodos actuales. Este método es menos útil para picos de fluencia amplios.

2.4. Para este método, la anchura correcta del intervalo de evaluación depende del nuevo sistema y su identificación requiere, por parte del usuario, un conocimiento del método de ensayo y del material sometido a ensayo.

Los puntos presentados muestran que hay múltiples formas para determinar el límite de fluencia, tal como sucede para otros puntos de la curva tensión-deformación [9]. El borrador de trabajo de la normativa ISO especifica que una solución podría ser un sistema de verificación. Éste implicaría un conjunto de datos de referencia (curvas esfuerzo-deformación) para los cuales los expertos deben acordar las propiedades importantes de caracterización. Este conjunto de datos puede alimentar cualquier software de evaluación y puede utilizarse para comprobar si, o bajo que parámetros, el software presenta valores correctos.

Cabe añadir que los códigos numéricos no necesitan σ_y para la ejecución del análisis lineal, siendo este dato necesario para la valoración analítica en el post-proceso, especialmente por lo que al mapa de tensiones se refiere. Sin embargo, es un valor que define la caracterización elastoplástica de forma significativa.

La metodología que se presenta aporta una definición de dicha tensión ligada al valor del Módulo de Young a tracción.

3.1.2. MÓDULO ELÁSTICO A TRACCIÓN E_T

Una vez presentado el límite de fluencia (σ_y , ε_y) debe establecerse el valor del módulo elástico, relacionado en algunos casos directamente con el límite de fluencia (módulo elástico de cálculo).

Los fabricantes de polímeros, cuando deben especificar dicho módulo, escogen la definición que da el valor más alto debido a la importancia de éste para un primer *feeling* mecánico del material; si este valor puede oscilar unos cientos de MPa, a efectos comerciales se desea presentar el más favorable.

A continuación se listan las posibles acciones para la definición de este parámetro.

1. Módulo en el origen o Módulo tangente a tracción, E_{TO}

El primer módulo de Young que puede definirse es el módulo en el origen. Este dato es uno de los más utilizados para la caracterización mecánica de un material y se obtiene mediante regresión lineal con los primeros puntos obtenidos de la curva elastoplástica. Es un valor obtenido en un entorno local de la curva. Es lógico pensar que es el módulo más alto posible.

Para el ejemplo del PP se calcula un valor de $E=1467\text{MPa}$ (ver Figura 3.3, curva Módulo Origen).

2. Módulo secante a tracción, E_{TS}

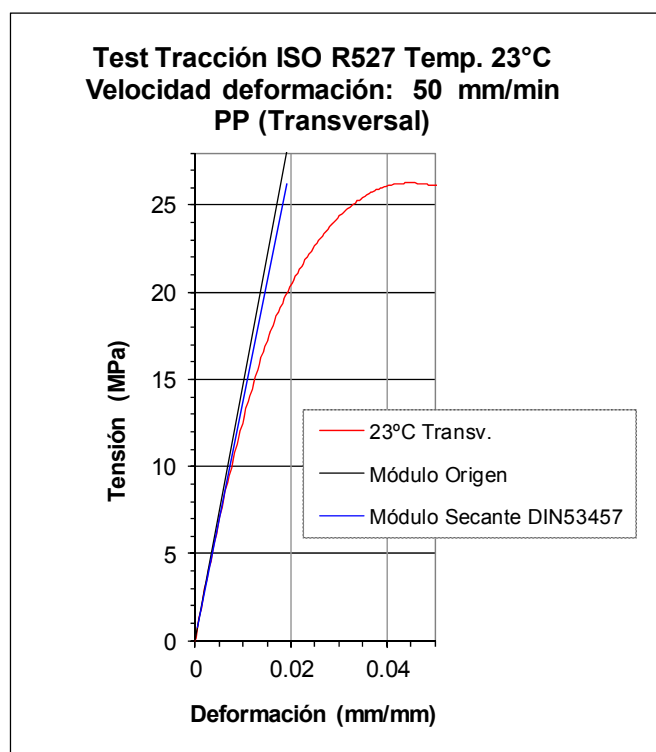


Figura 3.4. Detalle en el origen de la curva elastoplástica para el material PP. Módulo secante a tracción

Según la normativa ISO (con correspondencia a la DIN y la ASTM) para materiales plásticos [8], [10], [11], donde para valores inferiores al 0.25% de deformación longitudinal unitaria no se presenta linealidad, es posible establecer el módulo elástico como la relación entre el incremento de tensión ($\sigma_2 - \sigma_1$) y el incremento de alargamiento unitario ($\varepsilon_2 - \varepsilon_1$) para $\varepsilon_1=0,05\%$ y $\varepsilon_2=0,25\%$, según:

$$E_{TS} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Ecuación 3.2

Para el ejemplo del PP se calcula un valor de $E_{TS}=1382\text{MPa}$.

3. Módulo secante de cálculo, E_{TC}

Corresponde al módulo elástico de cálculo, obtenido a partir de la definición del límite de fluencia σ_y . Una vez seleccionado este límite, el modelo constitutivo describe el comportamiento lineal a través de la curva trazada desde el origen hasta esta tensión. Este módulo elástico puede llegar a ser muy distinto a los presentados anteriormente.

Se ilustra la problemática de definición del módulo de cálculo mediante la elección del límite de fluencia, a partir de la curva extraída del material POM industrial, ejemplo anteriormente usado. El fabricante define el límite de fluencia de 49 MPa, muy cercano al de rotura, por lo que el trazo lineal que caracteriza la zona elástica cae considerablemente si se escoge la tensión de fluencia como límite para definir la transición elástica-plástica.

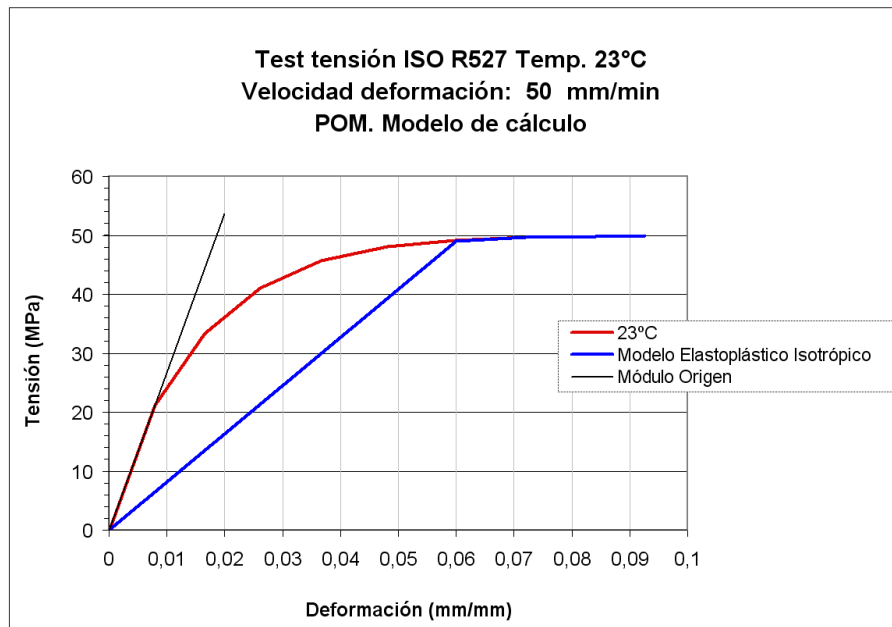


Figura 3.5. Modelo elastoplástico de cálculo (azul) seleccionando σ_y del fabricante, para un material POM industrial [12]

En concreto, el valor de E_{TO} cae de un valor de 2700 MPa hallado en el origen a un valor de 815 MPa. El modelo constitutivo elastoplástico, fruto de la división mediante σ_y , resulta muy pobre para este material en la zona elástica (curva azul).

3.1.3. TENSION Y DEFORMACIÓN VERDADERA σ_T, ε_T

En el ensayo de tracción uniaxial, una vez el material supera el límite máximo, la extensión de la probeta deja de ser uniforme, empezando a presentar estricción localizándose en una determinada zona de la muestra. El estado tensional descrito a partir del tensor de Cauchy (Ecuación 3.1) cambia gradualmente a un estado tensional de mayor complejidad, evolucionando hacia el estado triaxial en probetas de sección circular [13] (usadas habitualmente para materiales metálicos) o biaxial en el caso de probetas planas (en polímeros). Consecuentemente, esta transformación conlleva la dificultad de poder caracterizar con exactitud el ensayo de tracción uniaxial, únicamente con expresiones analíticas, en la etapa plástica.

Existen dos estrategias para lograr mejorar la curva tensión-deformación de ingeniería: la del ajuste experimental de la curva a través de un ejercicio test-MEF y la analítica.

En el primer caso, mediante los valores obtenidos en la máquina universal, ésta se introduce en un modelo MEF de la probeta y se corrigen las pendientes locales mediante iteraciones de cálculo hasta lograr, en todo el recorrido, un comportamiento idéntico test-MEF, utilizando como parámetro de validación la curva fuerza-desplazamiento. La respuesta corregida queda expresada en valores verdaderos; tensión verdadera o natural σ_T , y deformación longitudinal unitaria verdadera o natural ε_T .

Una vez obtenida la modificación, el siguiente paso para un mejor ajuste, referente a materiales poliméricos, consistiría en llevar el ejercicio híbrido test-MEF a otro tipo ensayo donde también aparezca el esfuerzo de compresión y cortante, para introducir el efecto de cavitación. Esto es posible mediante flexión sobre probeta lineal en flexión a 3 puntos, o aún mejor, sobre probeta circular con apoyo anular, para abordar el estado biaxial. Otra posibilidad es mediante test de cortante o de compresión triaxial, en máquina universal.

Por lo que se refiere a la estrategia mediante corrección analítica, a lo largo de los años se han ido desarrollado diferentes expresiones, con distinto grado de complejidad asociado a la mayor o menor dificultad para la obtención de los datos del material.

El modelo clásico de Hencky, para metales, contempla la variación de la sección transversal de la probeta, especialmente en la fase de fluencia cuando existe estricción, según la corrección logarítmica [14]:

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon)$$

Ecuación 3.3

$$\varepsilon_T = \int_{l_o}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_o} = \ln(1 + \varepsilon)$$

Ecuación 3.4

donde σ_T es la tensión verdadera, A_i el área transversal instantánea, ε_T la deformación longitudinal unitaria verdadera, l_o la longitud inicial y l_i la longitud instantánea.

Esta conversión acepta la premisa que la deformación es uniforme, es decir, todos los puntos de la sección transversal presentan el mismo tensor tensión, y que no existe cambio de volumen durante la fase de deformación plástica del material (premisa para la deducción de la Ecuación 3.3).

Si no se acepta esta condición, caso no uniforme, puede escribirse:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right)$$

Ecuación 3.5

Esta expresión presenta la dificultad de medir ΔF y ΔA , por lo que es solo un planteamiento teórico. A efectos prácticos, tan solo es posible usar las Ecuaciones 3.3 y 3.4, que implican una deformación uniforme, controlando la fuerza y la variación de la sección transversal. Para deformación no uniforme, únicamente puede ser obtenida experimentalmente una media de los tensores tensión de los puntos de la sección. De ahí la dificultad de encontrar modelos matemáticos contrastados, mediante test, para la región plástica.

De entre las numerosas ecuaciones para corregir la curva a valores verdaderos (para materiales metálicos), algunas se centran en la mejora de corrección del tipo de sección, partiendo de la expresión clásica de Bridgman [15] deducida para sección circular.

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\left(1 + \frac{2 \cdot R}{a}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{a}{2 \cdot R}\right)}$$

Ecuación 3.6

donde R es la curvatura tomada en la zona donde se presenta la reducción marcada de la sección, y a el radio de la sección de la probeta.

Esta fórmula asume una distribución tensional axisimétrica [13], [16], por lo que no resulta válida para muestras de sección rectangular. Aronofsky mostró que la distribución de tensiones era no uniforme para sección rectangular [17]. Tvergaard, a su vez, que la distribución era compleja y que variaba en función de la relación entre aristas de la sección (*aspect ratio*) [18]. Otros investigadores modificaron el efecto de la geometría de la sección acompañando de validaciones experimentales [19], [20], añadiendo constantes a la Ecuación 3.6 para cada material (distintos aceros) y geometría de sección [21], [22], y en algunos casos con constantes no fáciles de hallar [23]. Choung y Cho [24] desarrollaron una corrección para muestras de sección rectangular, donde la deformación se trata de forma exponencial. Como puede verse, muchas de ellas son dependientes del material, por lo que resultan limitadas como expresiones genéricas de uso.

De entre los modelos que se basan en ecuaciones para metales usadas con polímeros, las de Pampillo y Davis [25] y Bahadur [26] arrancan con el modelo clásico (Ecuación 3.3 y 3.4) para investigar el comportamiento del PVC y del HDPE, siendo el primer estudio riguroso sobre el comportamiento a fluencia de estos materiales.

La premisa que la deformación es uniforme a lo largo de la probeta y que no existe cambio de volumen durante la fase de deformación plástica del material conduce a que el coeficiente de Poisson se mantiene constante a valor 0.5 (material incompresible). Esto es cierto para metales pero no puede afirmarse directamente para polímeros frente a grandes deformaciones, donde el coeficiente parte de aproximadamente 0.4 cayendo hasta valores de 0.2-0.3 cuando aparece el fenómeno de estricción [27], [28].

Duffo et ál [29] propusieron un modelo de corrección con buena respuesta para polímeros en todas las zonas de la curva. Sin embargo, esta formulación no resulta sencilla, dependiendo del coeficiente de visco-elasticidad w , el coeficiente de endurecimiento h y la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$. Otros autores presentan modelos constitutivos en la misma línea, para materiales semi-cristalinos [30], [31].

Debido a la complejidad de los modelos de corrección a valores verdaderos, suele aceptarse como simplificación el uso del modelo clásico para metales aplicado a materiales poliméricos (Ecuación 3.3 y 3.4).

En la siguiente imagen (Figura 3.6) se muestra la corrección realizada a partir del límite de fluencia de esta corrección, para el material polipropileno de ejemplo.

Finalmente comentar que si se puede disponer de la variación del coeficiente de Poisson de forma empírica, la tensión verdadera puede calcularse según otra expresión [32]:

$$\sigma_T = \frac{\sigma}{(1 - \nu \cdot \varepsilon)}$$

Ecuación 3.7

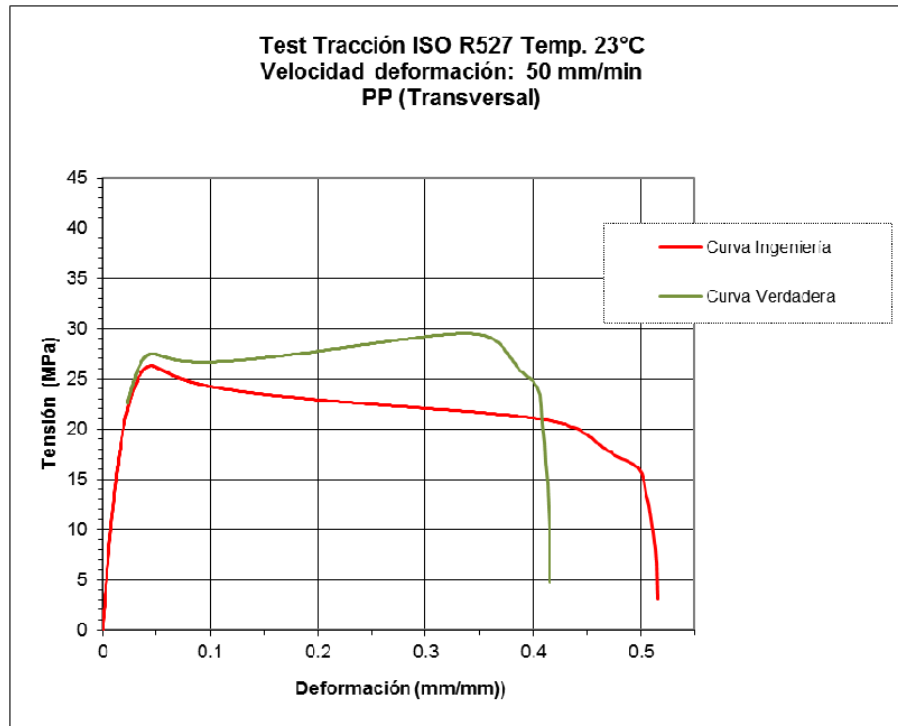


Figura 3.6. Corrección a valores verdaderos mediante formulación clásica. Ejemplo PP

3.1.4. CORRECCIÓN DE LA CURVA VERDADERA A PARTIR DEL PUNTO MÁXIMO

La teoría clásica expone que, para los materiales plásticos, el límite que precede al fenómeno de estricción es el de la tensión máxima. En este punto de máxima fuerza, la tensión de ingeniería puede escribirse como:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

Ecuación 3.8

y la tensión verdadera:

$$\sigma_T = \frac{F_{\max}}{A}$$

Ecuación 3.9

siendo A el área de la sección transversal instantánea. Esta tensión puede expresarse también como:

$$\sigma_T = \sigma_{\max} \cdot \frac{A_0}{A}$$

Ecuación 3.10

o, a partir de la deformación media verdadera en la mínima sección $\varepsilon_{T,eq}$, también conocida como deformación logarítmica verdadera o deformación de Bridgman [33]:

$$\varepsilon_{T,eq} = \ln \frac{A_0}{A}$$

Ecuación 3.11

$$\sigma_T = \sigma_{\max} \cdot e^{\varepsilon_{T,eq}}$$

Ecuación 3.12

La Ecuación 3.11 permite obtener la deformación promedio experimentalmente, mediante lectura de la reducción instantánea de la sección transversal mínima.

La Ecuación 3.12 muestra la forma clásica de expresar la tensión verdadera, para todos aquellos puntos más allá del σ_{\max} , versus la deformación verdadera contemplando el fenómeno de estricción. Aplicando esta formulación con referencia al punto de máxima fuerza (ε_{\max}), se tiene:

$$\sigma_T = \sigma_{\max} \cdot e^{(\varepsilon_{T,eq} - \varepsilon_{\max})}$$

Ecuación 3.13

Esta expresión ha dado pie a distintas correcciones, no siempre efectivas cuando se aplican para algunos polímeros. Una de ellas consiste en transformar el factor exponencial de la deformación en un término cuadrado.

$$\sigma_T = \sigma_{\max} \cdot e^{(\varepsilon_{T,eq} - \varepsilon_{\max})^2}$$

Ecuación 3.14

Se han efectuado estas dos correcciones sobre la curva de valores verdaderos del material de ejemplo PP, más allá del punto de tensión máxima. El modelo *Endurec1* corresponde a la Ecuación 3.13 y el modelo *Endurec2* sigue la expresión analítica 3.14.

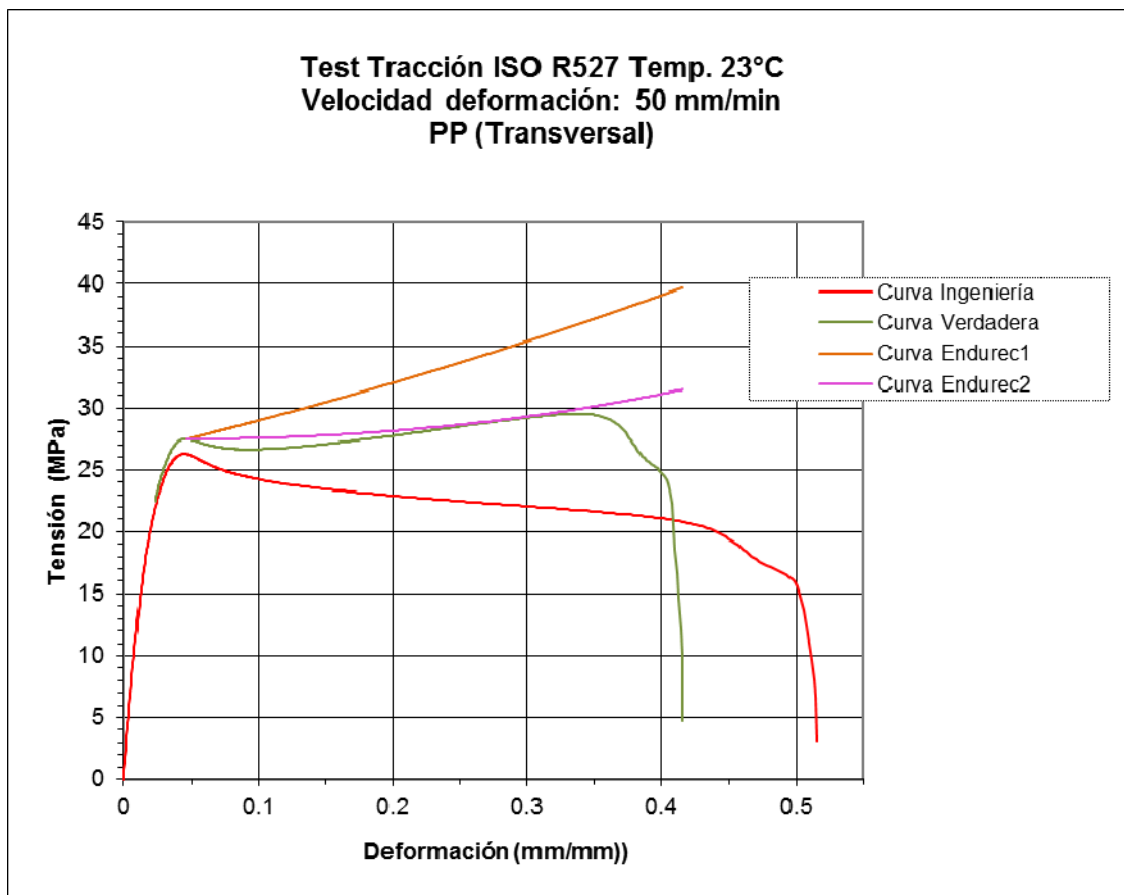


Figura 3.7. Correcciones a partir de la σ_{\max} de la curva de valores verdaderos usando el modelo de endurecimiento lineal (*Endurec1*) y el cuadrático (*Endurec2*). Material PP

Como puede apreciarse, el modelo de *Endurec1* aumenta, en este caso, los valores de tensión en comparación con el modelo *Endurec2*.

3.1.5. VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE POISSON ν

Para poder obtener la variación del coeficiente de Poisson durante el ensayo de tracción, se requiere de un sistema de extensómetro con doble lectura. También es posible mediante un dispositivo de videocámara, analizando posteriormente las imágenes y efectuando el cálculo.

No suele ser habitual disponer de esta doble lectura, por lo que es posible utilizar la siguiente formulación aproximada:

$$\nu = 0.5 - 0.2 \cdot \left(\frac{E_s}{E_0} \right)$$

Ecuación 3.15

donde E_s es el módulo secante en cada punto a lo largo de la curva isotérmica, y E_0 es el módulo tangente.

Arriaga et ál concluyen un efecto cuasi nulo mediante la variación del coeficiente de Poisson a partir de esta fórmula, combinada con la Ecuación 3.7, en el test físico de flexión biaxial mediante disco, test de perforación [34].

3.1.6. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN SEGÚN EL FLUJO DE INYECCIÓN

El concepto de isotropía no se cumple con exactitud cuando se habla de materiales plásticos no reforzados en la industria. El proceso de inyección siempre afecta (a veces de forma muy significativa) a la microestructura del material, según parámetros fijados en el proceso. Propiedades mecánicas como el límite de fluencia y la deformación longitudinal unitaria a rotura resultan modificadas substancialmente. Esta problemática se enfatiza considerablemente para materiales con refuerzo de fibras (*composites*), donde la dirección del flujo de inyección orienta las fibras a lo largo de ésta [35]. Se crea una capa superficial y otra intermedia, donde en la primera, las fibras se orientan de forma paralela, mientras que en la intermedia tienden hacia una posición perpendicular a la dirección del flujo (Figura 3.5). El material presenta también una deformación con marcado carácter anisotrópico [36].

Para el caso de los materiales poliméricos no reforzados, si bien hay un control preciso bastante estandarizado de los parámetros de inyección para probeta de ensayo (probeta ideal), además de ser más fáciles de estabilizar que en la inyección de piezas de elevada complejidad geométrica, es muy difícil obtener probetas con comportamiento

perfectamente isotrópico, ya sea mediante molde de probeta normalizada o con formato placa para posteriormente ser recortada.

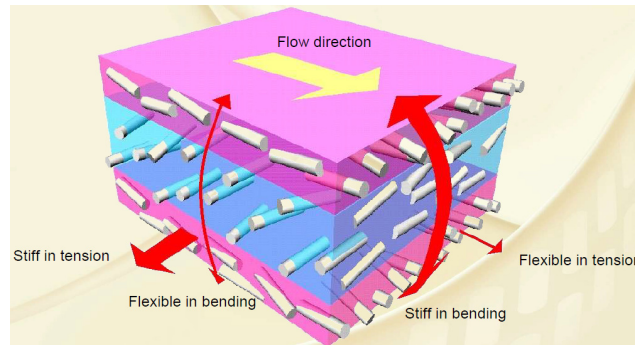


Figura 3.8. Orientación de las fibras, capa superficial e intermedia. S. Glase, A. Wüst [37]

Esta pseudo-anisotropía sucede en mayor grado cuando sobre la base polimérica se añade algún tipo de compuesto químico, como por ejemplo el talco (que es el refuerzo mineral más ampliamente utilizado para el polipropileno) [38]. Estos refuerzos, que propiamente no confieren carácter de *composite* al polímero, suelen ser habituales en la industria, para lograr un comportamiento adecuado según los requerimientos exigidos al producto industrial que se esté diseñando. En base al mismo estudio para materiales *composites* [37], se plantea la posibilidad de introducir la orientación local de las partículas de refuerzo mineral en el cálculo computacional y, mediante simulación integrada, lograr un grado de confianza más fino en la respuesta. Estas acciones abren una puerta a las investigaciones, incluso para materiales no compuestos, que deberá tenerse en cuenta. Su aceptación en uso industrial estará en función de los costes computacionales que presenten estas nuevas propuestas y su facilidad de uso en el entorno diario industrial.

A día de hoy es universalmente aceptado la utilización de valores medios (media de los datos obtenidos mediante probeta orientada según flujo y probeta orientada transversalmente) para estos materiales no reforzados con cargas minerales, en el uso de códigos numéricos. Se acepta el concepto de material polimérico isotrópico para este material con carga mineral (caracterizado con valores medios).

A continuación se muestran las propiedades de un Polipropileno con refuerzo del 15% de carga mineral de talco obtenido mediante inyección de probeta ideal. Este material se encuentra actualmente en uso industrial, por lo que no se muestra su nombre comercial, con el objetivo de preservar la confidencialidad de los datos.

Material	Test Temperatura (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/sec)	Modulo E (MPa)	Tensión Máxima (MPa)	Deform. máxima (%)	Tensión Ruptura (MPa)	Deform. Ruptura (%)
	23	Transv.	0,83	2210	24,3	2,9	19,9	26
		Long.	0,83	2500	26,5	3,3	21,3	15

Tabla 3.1. Valores mecánicos principales para un material PPT15, datos industriales

La Figura 3.9 refleja los datos que se usan en la industria de forma isotrópica. La obtención de datos más detallados obtenidos de este material muestran su carácter anisotrópico; en las dos direcciones de caracterización (transversal y longitudinal al flujo de inyección) los valores del módulo elástico son distintos, y la curva completa elastoplástica también (Tabla 3.1 y Figura 3.10).

Compounded Polyolefin			
Product Description			
is a 15% mineral filled, polypropylene copolymer for injection molding. It combines excellent stiffness/impact balance, good scratch resistance, low odor and excellent flowability properties with good dimensional stability. The grade has been specifically designed for molding of automotive interior trim parts. The grade is available in color-matched, pellet form.			
Product Characteristics			
Status	Commercial: Active		
Test Method used	ISO		
Availability	Europe, North America		
Processing Method	Injection Molding		
Features	Scratch Resistant, Good Stiffness		
Typical Customer Applications	Interior Applications		
Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Density	ISO 1183	1.01	g/cm ³
Melt flow rate (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	15,5	g/10 min
Mechanical			
Tensile Modulus (Secant)	ISO 527-1, -2	2500	MPa
Tensile Stress at Yield (50 mm/min)	ISO 527-1, -2	27	MPa
Impact			
Charpy notched impact strength	ISO 179		
(23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)		5,5	kJ/m ²
(-30 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)		3,5	kJ/m ²
Thermal			
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	ISO 75B-1, -2	116	°C
Heat deflection temperature A (1.80 MPa) Unannealed	ISO 75A-1, -2	64	°C

Figura 3.9. Ficha industrial, material PP con un 15% de carga de talco

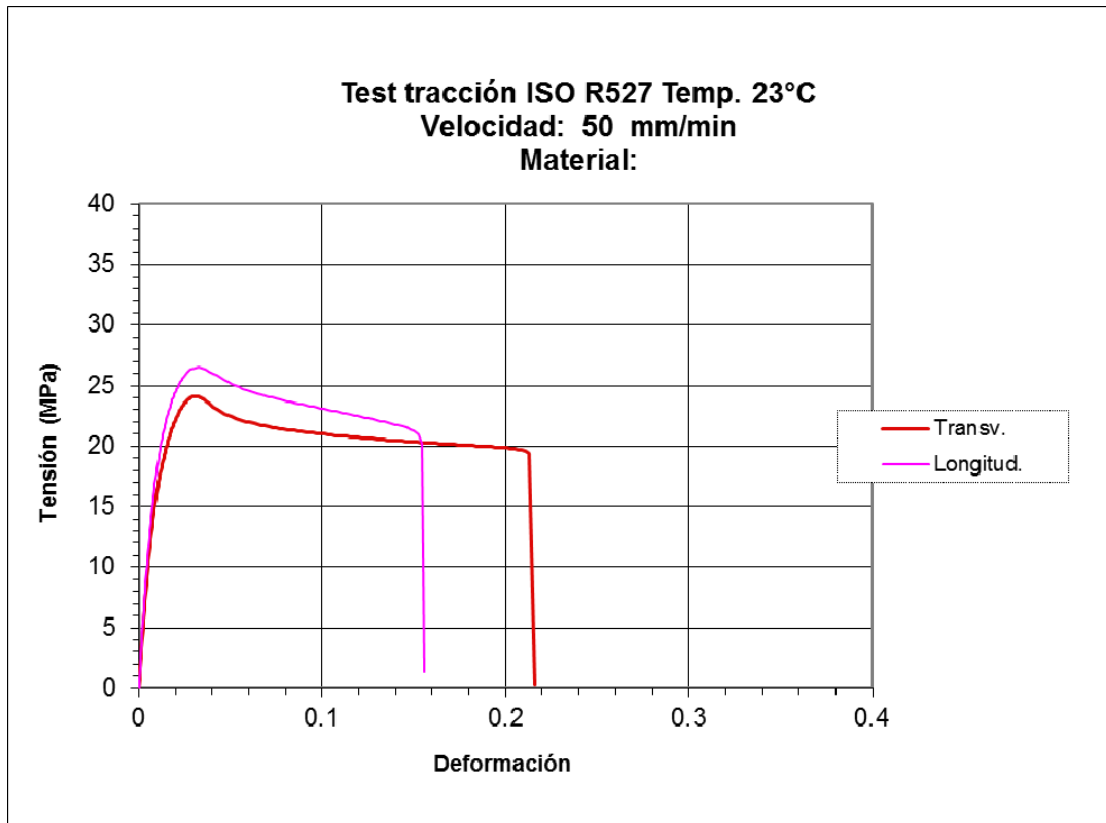


Figura 3.10. Curvas elastoplásticas a 23°C, PPT15, según dirección de inyección [1]

Como puede apreciarse, el valor representativo isotrópico presentado como módulo elástico E y límite de fluencia σ_y , corresponden a los valores para la dirección longitudinal, que coherentemente es la que responde a un mejor comportamiento mecánico.

3.1.7. INFLUENCIA DE OTROS PARÁMETROS EN INYECCIÓN DE PIEZA. PROBETA RECORTADA

En el proceso de inyección industrial de una pieza aparecen otras variables que tienen influencia en el comportamiento mecánico final del material, además de la dirección del flujo presentada en el punto anterior.

Los parámetros más importantes son la presión y la velocidad de enfriamiento. En una inyección de pieza real, estos parámetros estarán sujetos a:

- Espesores de pieza. Diseño de ésta.

- Temperatura de inyección por áreas. Sistema de refrigeración.
- Disposición de boquillas de inyección. Esto afecta a la caída de presión y a la temperatura. También a la secuencia de frentes de llenado, afectando las zonas de líneas de unión y tipología de éstas (frías o calientes), tensiones residuales, orientación de las cargas minerales, etc.
- Tipología de apertura de boquillas: global o secuencial. Relacionada con la anterior.
- Primera presión (variación en el tiempo) y segunda etapa de presión (y su tiempo de aplicación).
- Homogeneidad en la refrigeración. Afecta directamente a la temperatura, y vinculado a las otras variables.
- Otros parámetros como tiempo de mantenimiento del material en husillo (degradación por temperatura), tamaño de boquilla, etc.

En cada pieza se equilibran estos parámetros y se diseña el molde. La combinatoria es muy elevada. Evidentemente, un estudio de estas variables que no fuera simplificado en su planteamiento resultaría altamente costoso.

En el ámbito de la investigación, distintos autores han presentado resultados sobre probeta inyectada en molde o incluso sobre pieza, a partir de diseños de experimentos con un número limitado de estas variables [39–44]. El proceso de pieza real en línea de producción es más complejo, intervienen todas las variables anteriormente listadas, y a lo largo de la vida del producto algunas de ellas son modificadas (muchas son fijadas inicialmente cuando se dispone de los primeros desarrollos de la pieza) para rectificar el desgaste del molde, solucionar problemas de inestabilidad dimensional (*warpage*) debidos, por ejemplo, a un cambio en la pigmentación que provoca modificaciones en el coeficiente de contracción [45], [46], u otras causas que puedan variar el producto final.

Para una caracterización más fidedigna, debido a la dificultad de control de los parámetros de inyección en proceso industrial, puede caracterizarse el material mediante muestra extraída de piezas inyectadas (probeta recortada). En este caso, debe disponerse de la pieza real, situación que no siempre es posible en fase de diseño del producto.

Es cierto que cada pieza se inyecta con unos parámetros determinados para su producción, por lo que una curva obtenida de una pieza no es idéntica a la extraída del mismo material de una pieza distinta. Por lo tanto, para una muy buena caracterización representativa deberían conseguirse muestras de distintos componentes (con diseños diferentes) fabricados con un mismo material, y trazar su media. La presente tesis enfatiza este punto mediante el concepto de Factor de Escala Máster de un Material (Capítulo 4).

3.1.8. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

El rango de temperaturas que deben soportar los materiales poliméricos en su uso para producto industrial es variado. Una horquilla entre los -20°C hasta los 100°C abarcaría una gran parte de aplicaciones.

Estos materiales demuestran fuerte sensibilidad a la temperatura, pudiendo mostrar un comportamiento más vítreo o más dúctil dependiendo de su temperatura de transición vítrea GTT [1], [40],[41].

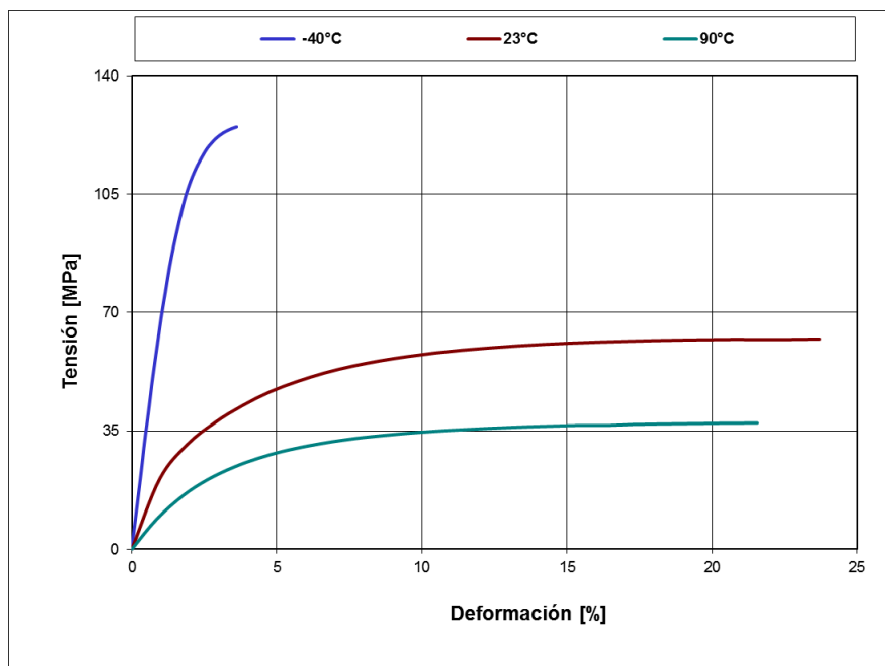


Figura 3.11. Curvas a diferentes temperaturas, resina Nylon con 40% de refuerzo mineral [49]

Las imágenes 3.11 y 3.12 muestran la influencia de la temperatura en dos termoplásticos. En la primera figura aparecen 3 curvas isotérmicas a diferente temperatura de una poliamida 6 con un 40% de refuerzo mineral (PA6-MD40). La

Figura 3.12 expone la caída del módulo secante E_{TS} a lo largo de la deformación longitudinal según varias temperaturas, para un material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

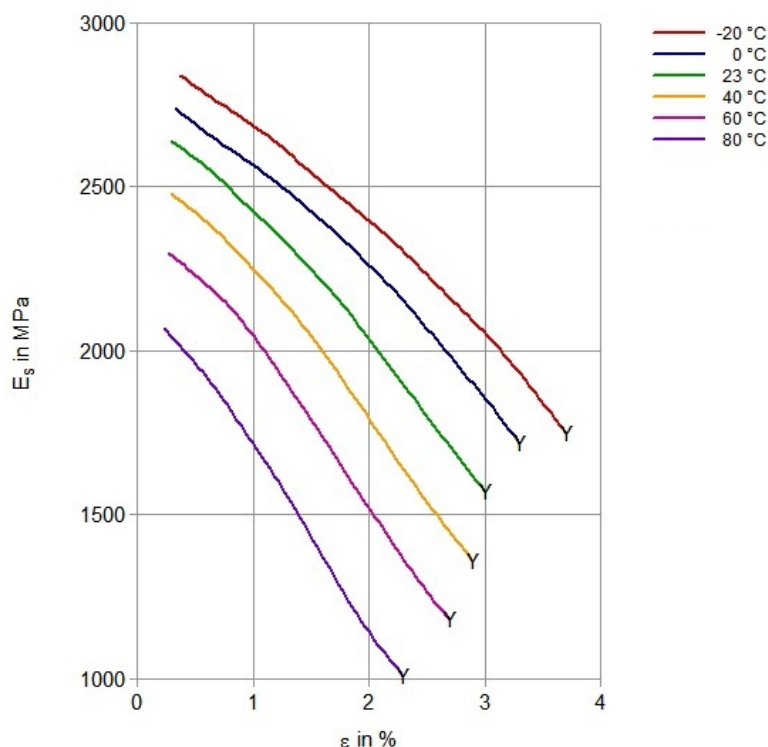


Figura 3.12. Módulo secante E_{TS} de un material ABS para varias temperaturas. Y: límite de fluencia [50]

3.1.9. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN $\dot{\epsilon}$

Existen muchos estudios en los cuales se pone en relieve la dependencia del comportamiento mecánico de los polímeros frente a la velocidad de deformación, debido a su carácter viscoelastoplástico [28], [51–58]. Es bien conocido que un incremento de esta velocidad modifica el módulo de Young de forma considerable, aumentándolo, mientras que el límite de rotura disminuye considerablemente, tal como puede verse en la siguiente imagen, para un material compuesto PP30% GF.

Resulta también muy importante fijar este parámetro en la caracterización, teniendo en cuenta que una definición de la curva a baja velocidad tan solo debe usarse para situaciones cuasi-estáticas.

Sin embargo, estudios más recientes muestran la posibilidad de extrapolar curvas a alta velocidad de deformación a partir de los datos cuasi-estáticos y de moderadas velocidades de deformación, para ser usadas en comportamiento dinámico.

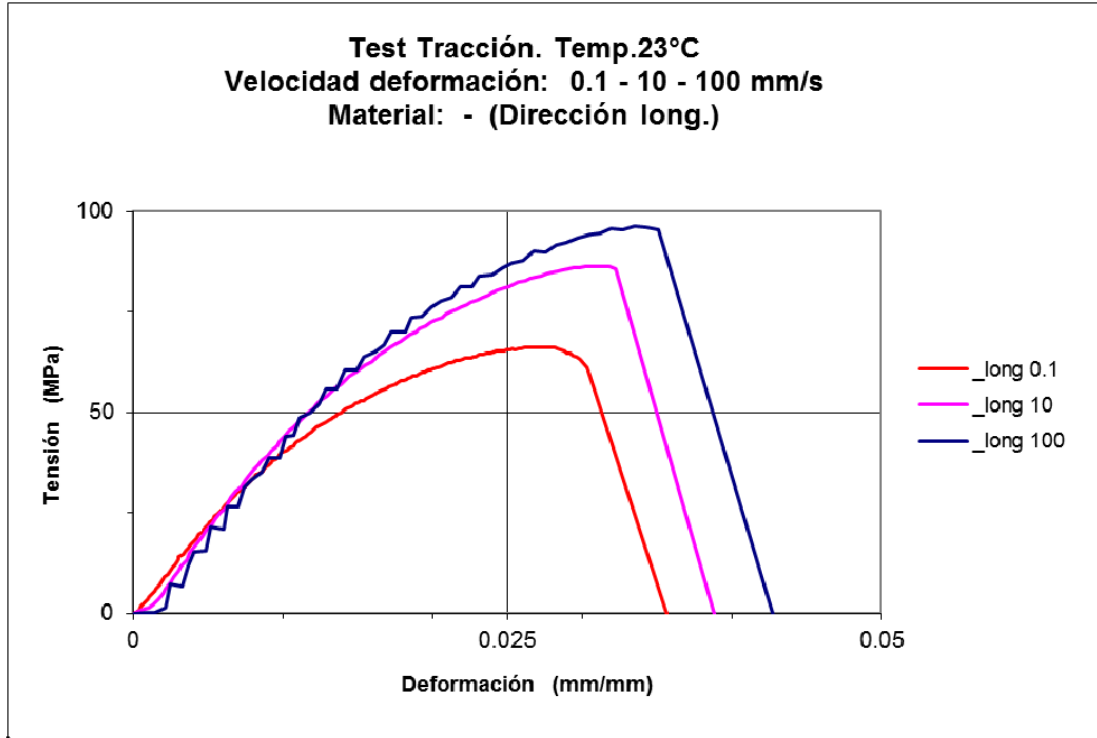


Figura 3.13. Curvas elastoplásticas a distintas velocidades de deformación, PP homopolímero con un 30% de fibra de vidrio [1]

Para realizar esta predicción es necesario estimar, en primer lugar, la dependencia del módulo elástico con la velocidad de deformación (dependencia del tiempo en fase elástica). En este caso es necesario añadir, al test de tracción, un ensayo de relajación, para estimar la caída del módulo tangente en función del tiempo. De este ensayo pueden obtenerse las variables necesarias para alimentar la siguiente expresión [59]:

$$\sigma(\varepsilon) = E_R \cdot \varepsilon + \frac{D \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon^{1-n}}{1-n}$$

Ecuación 3.16

donde E_R , D y n son parámetros propios del material.

Esta ecuación incluye la variación no lineal del módulo versus la velocidad de deformación.

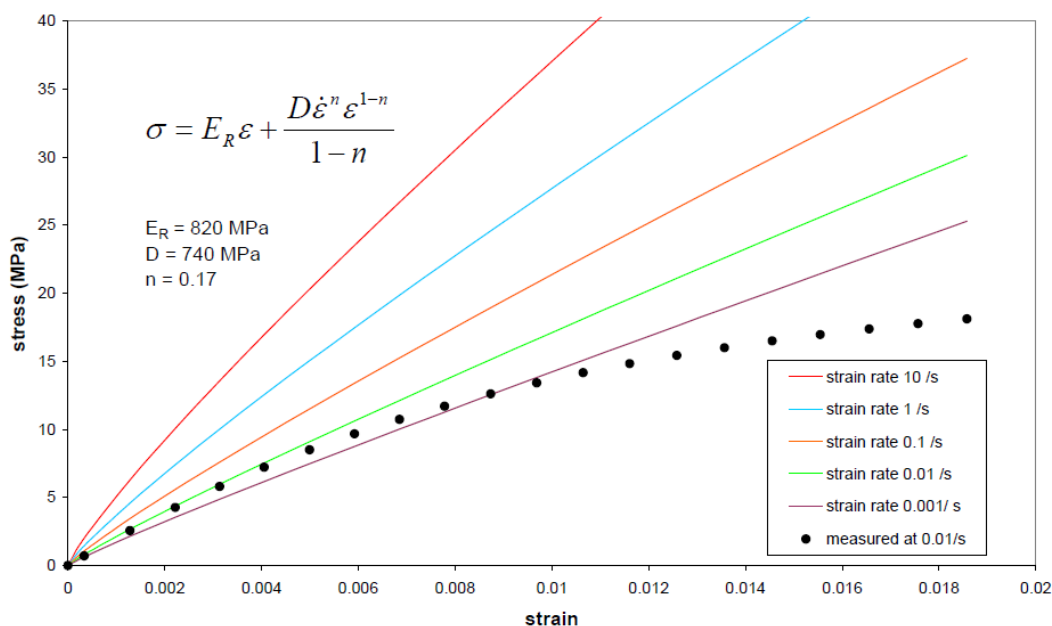


Figura 3.14. Módulo elástico según velocidad de deformación estimada, comportamiento viscoelástico, para un propileno-etileno copolímero con 17% de refuerzo mineral, Dow Plastics [59]

En esta etapa viscoelástica, también es posible mediante modelos viscoelásticos basados en series de Prony, estimar esta variación con la ayuda de un test DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*) [60], [61].

Por lo que a la curva de endurecimiento se refiere (dependencia del tiempo en fase plástica), para su extrapolación a otras velocidades de deformación, es necesario obtener en primer lugar, la forma de la curva de endurecimiento a baja y moderadas velocidades (curvas referencia). Posteriormente, determinar los parámetros del material del modelo constitutivo en función de la velocidad de deformación a partir de las curvas isotérmicas de referencia. Finalmente, realizar una extrapolación a altas velocidades de deformación [27].

3.1.10. INFLUENCIA DEL MÉTODO DE LECTURA EN EL ENSAYO

La bondad de la lectura experimental sobre la muestra en el test de máquina universal depende del mecanismo utilizado en el ensayo. Existen varias posibilidades para la lectura de la deformación: medida de la distancia entre mordazas, lectura mediante extensómetro mecánico de clip (mediante contacto), mediante extensómetro laser o mediante video-extensómetro.

Para una definición correcta del módulo tangente, es necesario disponer de al menos un extensómetro, siendo los que evitan el contacto (laser o video) los de mayor precisión. Arriaga et ál muestran un gráfico comparativo (Figura 3.15) realizado con el material ABS SINKRAL L320, de Borealis, manteniendo la misma velocidad de deformación de 50 mm/min, mediante extensómetro de clip y de láser [34].

Si bien el gráfico muestra cierta desviación, concluyen que, en general, ambos métodos de medición presentan resultados próximos.

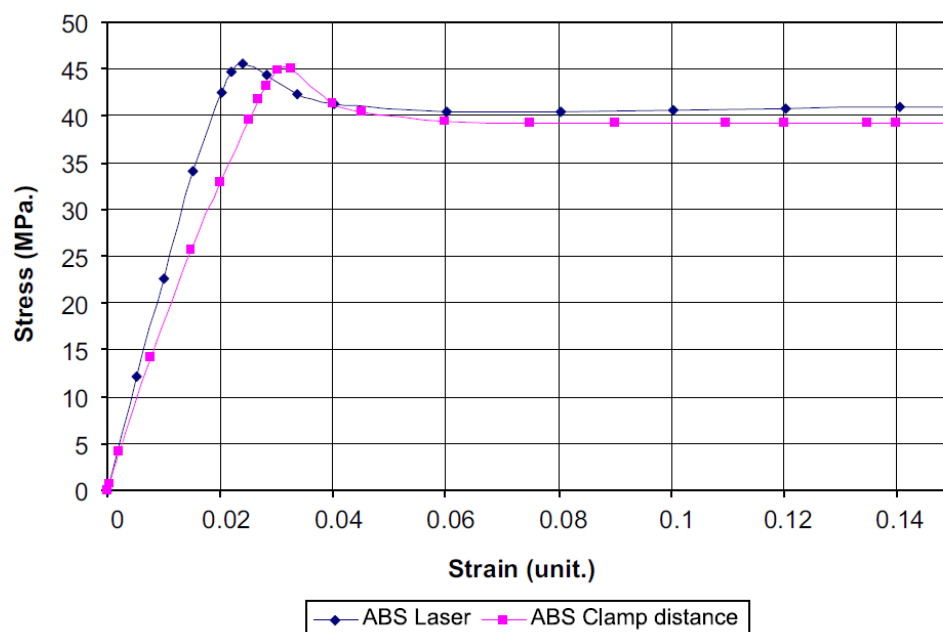


Figura 3.15. Comparativa curvas isotérmicas de un ABS usando distintas técnicas de medición

3.1.11. INFLUENCIA DEL TIPO DE ENSAYO

Es posible definir la relación entre el módulo tangente obtenido en el ensayo a tracción respecto al módulo deducido en ensayo de flexión a 3 puntos. Aunque usualmente suele realizarse la caracterización del material mediante tracción, en algún caso en bibliografía puede encontrarse el módulo tangente referido a flexión. Esta relación debe tomarse tan sólo como referencia, pues ambos ensayos presentan una distribución de tensiones distintas.

En el caso del ensayo a tracción, éste se considera como referencia de caracterización por excelencia debido a que todas las fibras presentan un mismo tensor tensión. Como hándicap, destacar que el material solo muestra carácter de tracción a lo largo de todo el

ensayo, por lo que no se está contemplando cortante ni compresión, importantes para un mejor ajuste en la estimación del tramo de endurecimiento (nucleación de vacantes).

En el caso de flexión, el material presenta comportamiento de tracción, compresión y cortante, siendo los dos primeros más relevantes que el último, teniendo en cuenta que la probeta tiene un espesor pequeño. Sin embargo, el módulo tangencial deducido para este tipo de test se calcula mediante el comportamiento de la fibra más solicitada, siendo esta lectura la representativa. Debe tenerse presente que la formulación se basa en la teoría de elasticidad, sin contemplar el efecto plástico.

Para el test a tracción, la deducción del módulo tangente se ha presentado en el capítulo anterior.

Para el caso de flexión, de la teoría de elasticidad para pequeños corrimientos [62], la deformación longitudinal que presenta la fibra más solicitada en la sección central, en la cota vertical $y=+e/2$ referenciada respecto al eje neutro (siendo e el espesor del espécimen), puede deducirse la deformación, de la ecuación diferencial de la deformada:

$$E_{fl} \cdot I_z \cdot v''(x) = M_z(x)$$

Ecuación 3.17

siendo E_{fl} el módulo tangente a flexión, I_z el momento segundo de superficie de la sección transversal, $v''(x)$ la derivada segunda de la función corrimiento, y $M_z(x)$ el momento flector en la sección situada en la posición genérica x . La deformación en la fibra de referencia ε_f resulta:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot \delta \cdot e}{L^2}$$

Ecuación 3.18

donde δ es la lectura vertical en el centro de la muestra, e el espesor de la probeta y L la distancia entre apoyos. δ puede expresarse como:

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot a \cdot e^3 \cdot E_{fl}}$$

Ecuación 3.19

Con E_{fl} módulo tangente a flexión, P la carga aplica en el centro de la probeta y a la anchura de ésta. De esta misma ecuación se deduce el módulo a flexión.

La tensión en la fibra más solicitada de toda la muestra es, según Navier [63]:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot a \cdot e^2}$$

Ecuación 3.20

3.1.12. ENVEJECIMIENTO NATURAL DEL MATERIAL

El fenómeno de envejecimiento es bien conocido a través de numerosos ensayos realizados sobre polímeros y existe una amplia bibliografía, donde se analizan los cambios que sufre el material a lo largo de un periodo de tiempo. Por lo que se refiere a comportamiento mecánico, las investigaciones se centran en parámetros asociados a los campos resistencia y rigidez.

Los cambios pueden ser debidos a causas químicas y físicas. La interacción con el medioambiente juega un papel fundamental en muchos productos fabricados con materiales termoplásticos.

Los materiales expuestos a la intemperie pueden degradarse mediante la acción de agentes tales como la radiación ultravioleta UV, el agua, los contaminantes, la temperatura sostenida a valores altos y a cambios de ésta. En la mayoría de casos, la principal causa de la pérdida de propiedades es la foto-oxidación, iniciada por la irradiación UV, no visible, caracterizada por longitudes de onda cortas. Esta foto-degradación generalmente causa la escisión y la reticulación de las cadenas moleculares, conduciendo a la fragilización del material.

Las reacciones que se llevan a cabo requieren de oxígeno, por lo que la mayor parte de la degradación, en una pieza fabricada con un material polimérico, se limita a una capa superficial relativamente delgada [64–68]. Algunos autores presentan varios procedimientos de detección de la profundidad de la capa de envejecimiento [69], [70].

Estos ensayos pueden llevarse a cabo, mediante aceleración del proceso, en laboratorio físico o en estaciones de envejecimiento natural, con amplios rangos de clima y distintos niveles de radiación [71].

La aceleración se realiza mediante el uso de una intensidad de radiación UV más alta respecto a la natural, y/o mediante longitudes de onda más bajas, o mediante el uso de niveles de temperatura más altos. Ciertos estudios demuestran que alguna de estas

técnicas pueden introducir reacciones químicas no presentes en el envejecimiento natural [72], [73] .

En esta investigación se presenta tan solo la degradación causada por esta irradiación, de forma natural, sin ningún tipo de aceleración, y para dos materiales concretos.

3.2. VARIABLES EN RELACIÓN AL MODELO MEF [74], [75]

A continuación se exponen distintos parámetros relacionados con el modelo de elementos finitos, para un control del grado de confianza de los resultados en simulación.

3.2.1. TIPO DE NO LINEALIDADES

La presencia de no linealidades en el fenómeno físico a estudiar influye directamente en el modelo MEF a implementar, para una gestión eficiente del tiempo de cálculo y grado de confianza en los resultados. Los tipos de no linealidades, en el planteamiento estructural, pueden clasificarse según las familias siguientes:

1. No linealidad geométrica
2. No linealidad de material
3. No linealidad de contorno

1. No linealidad geométrica

En ocasiones las variaciones geométricas que sufre la estructura de estudio pueden ser significativas y deben contemplarse en el análisis.

a. Grandes desplazamientos

Hace referencia a aquellos casos donde debe tenerse en cuenta la deformación del modelo a lo largo del proceso de aplicación de las solicitaciones. Un ejemplo clásico para mostrar esta fuente de no linealidad es el caso del diseño de una caña de pescar, donde la variación del brazo de palanca del pez respecto al pescador debe tenerse muy en cuenta. El balance de momentos resulta substancialmente distinto si se plantea el equilibrio de fuerzas bajo hipótesis de caña perfectamente rígida (sin variación geométrica) del planteado teniendo en cuenta la flexibilidad de ésta. Lo

mismo sucede para una viga en voladizo (Figura 3.16) con nivel alto de valores de corrimientos.

En estos casos, debe actualizarse la geometría a lo largo del análisis para resultados satisfactorios.

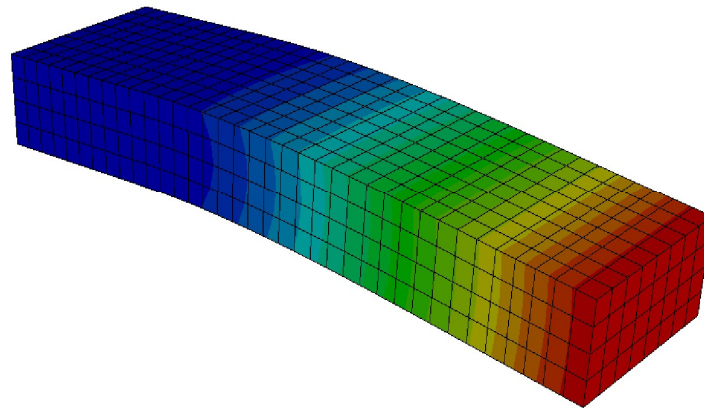


Figura 3.16. Mapa de corrimientos (según colores) no despreciables de una viga en voladizo bajo niveles de carga altos. Modelo FEM

b. Grandes rotaciones

De la misma forma que el caso anterior, el corrimiento giro debe controlarse para casos de rotaciones significativas, afectando la lectura de este giro a variables importantes si se desprecia su variación. En la figura anterior no sólo debe tenerse en cuenta los desplazamientos lineales sino que también los giros presentados en cada sección.

c. Grandes deformaciones

La teoría lineal de la Mecánica del Sólido Deformable acepta la hipótesis de que los corrimientos son pequeños (valores inferiores al 5% aproximadamente). Para situaciones de mayor deformación el problema debe plantearse bajo el concepto de grandes deformaciones, donde la estructura puede incluso perder parte o completamente su configuración inicial.

Ejemplos de este tipo de no linealidad suelen darse en elastómeros, donde la deformación en muchos casos resulta significativa.

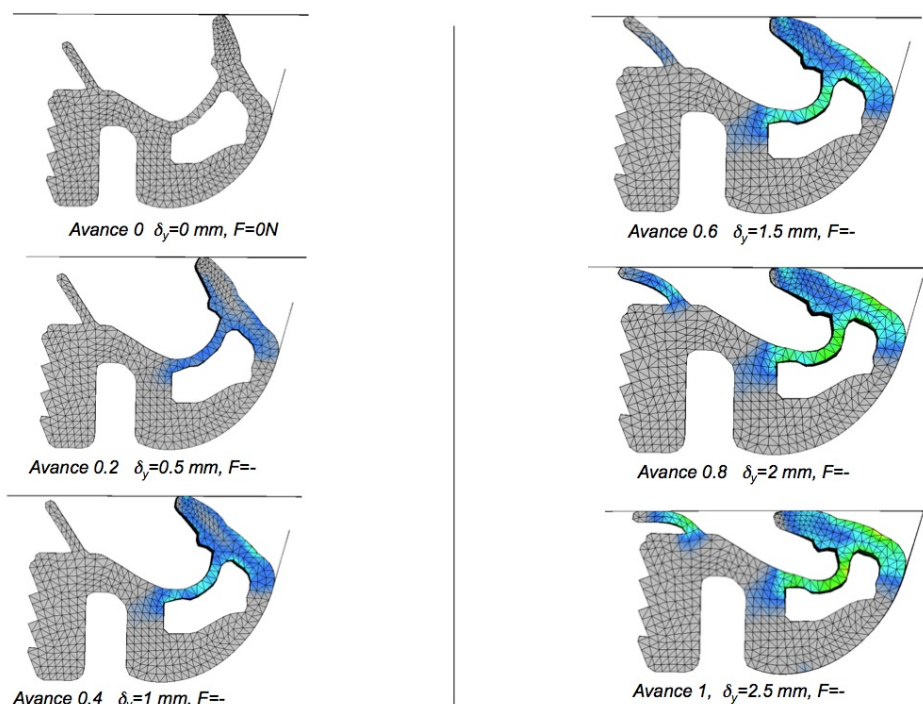


Figura 3.17. Mapa de tensiones equivalente de Von Mises sobre deformada (según colores) de una junta elastomérica de un panel de puerta para automoción. Configuraciones a lo largo del proceso de carga* [76]

* Valores de fuerza no mostrados según criterios de confidencialidad

2. No linealidad del material

Tal como se ha presentado a lo largo presente trabajo, una de las no linealidades importantes a tener en cuenta en un cálculo estructural es el comportamiento resistencial (tensiones) y deformacional del material. Esta tesis se basa en el uso del modelo constitutivo no lineal clásico de Von Mises.

Debe plantearse la bondad de la ecuación analítica del material antes de realizar cualquier análisis. Un modelo constitutivo de cierta complejidad condiciona la elección del tipo de elemento a seleccionar. En el caso de la junta elastomérica de la Figura 3.17, la combinación de un modelo viscoeloplástico altamente no lineal junto a las grandes deformaciones indican la necesidad de implementar un modelo MEF con el número mínimo de elementos, para respuestas suficientemente cortas durante el diseño de la sección. Parece muy adecuado establecer, para esta fase inicial de diseño, un planteamiento de deformación plana, con elementos tipo Shell, mediante

el trazo de la sección a través de un fichero CAD 2D. A modo de validación final, el análisis puede lanzarse con un modelo 3D de detalle, pudiendo consumir hasta varios días de cálculo.

Los modelos constitutivos no lineales más importantes se resumen como elásticos no lineales, hiperelásticos, viscoelásticos y viscoelastoplásticos. Cabe añadir aquellos modelos que formulan la respuesta mediante teorías de daño constitutivo para predecir el inicio de grieta, para contemplar la propagación de ésta, modelos complejos basados en la mecánica de la fractura, etc.

3. No linealidad de contorno

Este tipo de no linealidad puede clasificarse como:

a. Condiciones de contorno cinemáticas

b. Condiciones de contorno estáticas

a. Condiciones de contorno cinemáticas

Las constricciones entre la zona de estudio y su entorno pueden variar a lo largo del análisis.

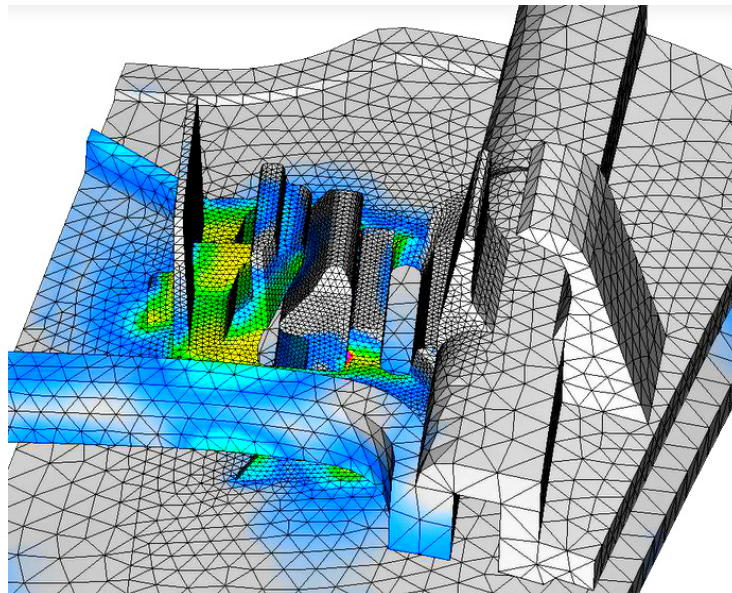


Figura 3.18. Mapa de tensiones equivalentes de Von Mises de un ensamblaje de un clip.
Condiciones cinemáticas de contacto clip-posicionador [77]

El ejemplo más típico es el problema de contacto, en que el área de interacción entre

las superficies define la presión de contacto y ésta suele variar a lo largo del cálculo.

En la Figura 3.18 se presenta un modelo de detalle de un clip, donde se ha implementado una densidad de malla gradual para lograr un tamaño de elemento adecuado en el área de interacción. Se han utilizado elementos de contacto para abordar las constricciones cinemáticas. Estas restricciones instantáneas influyen en la distribución de tensiones a lo largo del deslizamiento del clip.

b. Condiciones de contorno estáticas

Hace referencia a la forma de aplicación de la carga sobre la superficie a lo largo del análisis. Como ejemplo usual, en una situación de presión perpendicular sobre una membrana, cuando aparece la deformación, la presión aplicada debe seguir a los cambios presentados por la geometría, por lo que hay una variación en módulo de la presión.

3.2.2. TIPO DE ELEMENTO

La selección del tipo de modelización a realizar (tipo de elemento), es decir, la elección entre una discretización lineal, 2D o 3D puede tener gran influencia en la precisión de los resultados, a su vez que impacta directamente en la viabilidad global del cálculo (tiempos computacionales, facilidad de lograr la convergencia, etc.). En algunos casos, la diferencia en esta selección puede no percibirse en un primer momento, cuando se examina el campo de fuerzas, e incluso en el de corrimientos, pero un análisis de la distribución de tensiones o deformaciones puede mostrar divergencias significativas.

En los códigos numéricos existe una gran variedad de familias de elementos a disposición, de cada uno de los dos tipos anteriormente mencionados [78], [79]. En cada familia se encuentran elementos que pueden implementarse en no linealidades de todo tipo, habiendo versiones más simples con distintos rendimientos computacionales.

3.2.2.1. Elementos tipo Placa (*Shell*)

Es muy habitual el uso del tipo de elementos Placa para modelizar piezas de plástico, debido a que estos componentes presentan un espesor bastante reducido (espesores usuales de 2-3 mm). El grosor se asocia como propiedad del elemento, por lo que la modelización es bidimensional, sin visualizarse éste. El sistema contempla por defecto, a nivel de cálculo, un espesor uniformemente repartido, situando el sistema de coordenada local del elemento en la superficie de modelización. El grosor se reparte por

igual a ambos lados de esta superficie, definiéndose un lado como positivo o *Top* (respecto el sistema de coordenadas) y el otro como el negativo o *Bottom*. Es importante que los elementos adyacentes estén orientados de igual forma, para una correcta obtención de las variables respuesta.

Una implementación de estos elementos 2D conlleva, como gran ventaja, un nivel óptimo de número de elementos frente a tiempos de cálculo.

Como desventaja, citar la pérdida de detalle, por lo que la lectura de la distribución de las variables respuesta debe realizarse con mucha precaución. Añadir que, en la etapa de discretización, no es inmediata la obtención de la superficie intermedia a partir del apoyo de un fichero CAD, donde se reciben las 2 pieles que conforman cada una de las paredes de la pieza de estudio. Debe trazarse esta nueva superficie en posición intermedia y esta tarea suele resultar larga en el tiempo si se desea completar un conjunto completo de piezas. Una técnica habitualmente usada, para reducir tiempo, consiste en utilizar una de las pieles laterales y realizar un desplazamiento *offset* de esta superficie para posicionarla correctamente. En estas dos últimas décadas, los técnicos de códigos numéricos han invertido mucho esfuerzo en habilitar herramientas para lograr agilizar la tarea de la creación de la superficie intermedia.

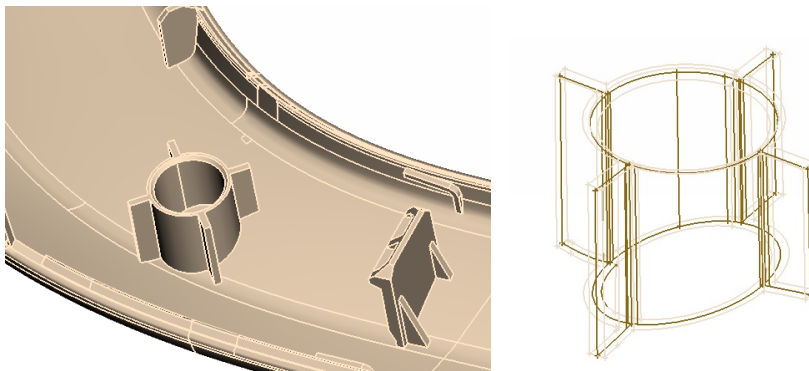


Figura 3.19. Detalle de la creación de la superficie intermedia sobre CAD 3D, cilindro central con nervios

Para abordar la modelización de un cuerpo espacial mediante elementos tipo placa, se descartan aquellos elementos con formulación asociada a tensión plana, a deformación plana o a axisimetría. La formulación debe ser genérica, seleccionándose algún tipo Shell que lleve implementado la teoría de placa gruesa, para incluir la deformación asociada a los esfuerzos cortantes, para una mayor precisión en la respuesta de la deformada.

Los elementos tipo placa (QUAD) que suelen utilizarse están formados por 4 nodos por elemento, con seis grados de libertad asociados a cada nodo (traslaciones en los ejes x , y y z , y rotaciones alrededor de los tres ejes), y disponen de capacidad de absorción de esfuerzo de membrana y de flexión.

Se tolera el uso de elementos con un nodo degenerado, transformados en elementos triangulares (TRIAD). Sin embargo este tipo de elemento triangular presenta un comportamiento iso-deformacional y, consecuentemente, iso-tensional, a lo largo de todo el elemento, por lo que debe usarse con tamaños de arista reducidos, asegurando que no haya saturación de ellos en zonas importantes de estudio. O bien, usar segundo orden (con funciones de interpolación cuadráticas) si se cree necesario.

Estos elementos tipo placa suelen usarse para enfoques globales de simulación, con el fin de obtener el estatus global de la estructura.

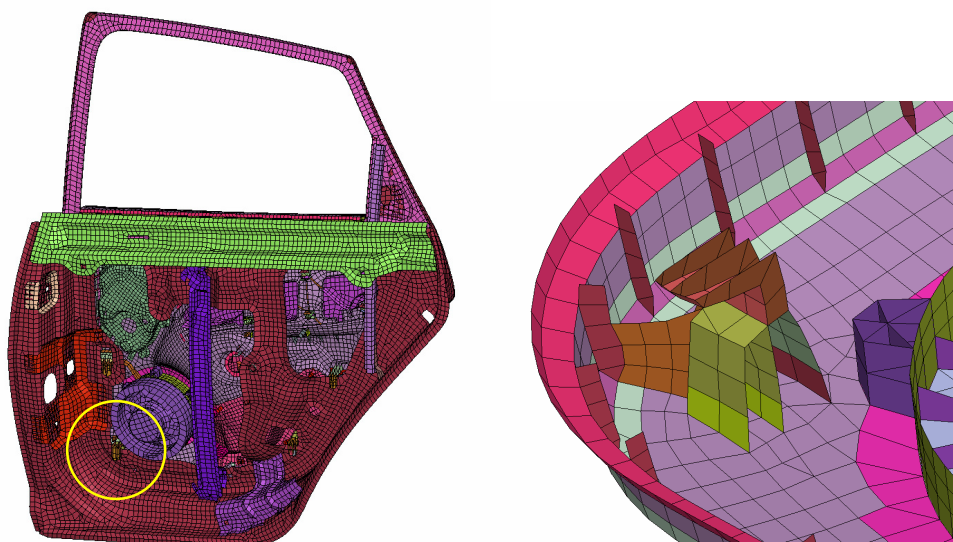


Figura 3.20. Malla conjunto Módulo Panel Puerta para automóvil con elementos placa, modelo global. Detalle de un clip del modelo (espesores definidos según mapa de colores) [80]

En caso de requerirse mayor precisión, una opción consiste en refinar o utilizar elementos de segundo orden. Debe tenerse en cuenta que se ha implementado una geometría intermedia concreta para un tamaño de malla especificado, despreciando o simplificando detalles, por lo que un refinado sobre el mismo modelo basto puede no conllevar una malla más representativa en ciertas zonas. La opción adecuada consiste, en algunos casos, crear un modelo a menor escala, con elementos tipo Sólido, manteniendo los detalles de la geometría CAD.

3.2.2.2. Elementos tipo Sólido (*Solid*)

En general, estos elementos tienen como principal desventaja un tiempo computacional largo. Si se está usando conjuntos con un volumen muy elevado de elementos, esta característica puede resultar un problema de viabilidad en industria, especialmente cuando se realizan análisis no lineales. Debe tenerse en cuenta que si se quieren garantizar 3 elementos a lo largo del espesor para una buena captura de la distribución de tensiones (posibilidad de capturar el gradiente a lo largo del grosor), esto conlleva longitudes de arista del elemento de 1 mm aproximadamente o valores inferiores. Consecuentemente, una pieza de tamaño medio se discretiza con un número elevadísimo de elementos para una sola pieza (centenares de miles de elementos). Si se contempla un ensamblaje completo, el número total de nodos alcanza valores computacionalmente no viables. El ejemplo de la Figura 3.18 resulta ilustrativo, si se piensa en aplicar este tipo de mallado al Módulo Panel Puerta presentado en la Figura 3.20.

Estos elementos resultan imprescindibles para simulaciones de detalle.

Los elementos tipo sólido usuales están formados por 4 nodos por elemento (TETRA4) o 8 nodos (HEXA8), según si su forma es piramidal o hexagonal, con tres grados de libertad asociados a cada nodo.

Los elementos piramidales son degeneraciones del elemento hexagonal. De la misma forma que sucede con los elementos placa triangulares, las pirámides no son deseables debido a su carácter iso-deformacional e iso-tensional, por lo que debe tenerse muy en cuenta el tamaño de arista del elemento si se implementan, que debe ser pequeño para compensar la incapacidad de presentar gradientes a lo largo del elemento. De la misma forma que para los elementos placa, una solución para mayor precisión consiste en usar elementos TRIAD de segundo orden o realizar un refinado de malla, aumentando la densidad en las zonas de mayor interés (Figura 3.18).

3.2.3. GRADO DEL ELEMENTO

Tal como se ha comentado anteriormente, para mejorar la respuesta obtenida en simulación, especialmente para el campo tensional, existe la posibilidad de implementar elementos de segundo orden en lugar de los elementos lineales. Estos elementos usan funciones de interpolación de segundo orden para dar respuesta a los corrimientos nodales de los puntos interiores del elemento a partir del vector de corrimientos nodales,

mejorando el gradiente de los parámetros respuesta. En los casos de uso de elementos triangulares, tanto en 2D como en 3D, seleccionar este tipo de grado suele conllevar una mejora importante, especialmente cuando el tamaño de arista del elemento no es muy pequeño.

Los elementos 2D de segundo orden de uso habitual son las placas de 6 nodos (mejora del TRIAD3, con nodos intermedios en cada arista) y las pirámides triangulares de 9 nodos (mejora del TETRA4, con nodos intermedios en cada arista).

3.2.4. DENSIDAD DE MALLA

La densidad de malla se mide mediante el número de elementos creados en una zona concreta, y es un factor determinante para lograr calidad en los resultados. Mayor densidad de malla implica mejor bondad en la respuesta, especialmente por lo que al campo de tensiones se refiere. Existe un valor de densidad con el que se alcanza la estabilización de la respuesta.

Una de las primeras decisiones que deben tomarse en la fase de creación de mallado, una vez seleccionado el tipo de elemento, es la longitud media de arista que debe tener el elemento. Este valor establece el orden de magnitud de nodos que resultarán: más nodos, más tiempo computacional. Dicho valor suele determinarse a partir de la experiencia. En el caso de carecer de ella, se recomienda fijar un valor basto, e ir ejecutando análisis hasta lograr encontrar unas distribuciones de tensiones independientes de la acción del refinado. Se recomienda disminuir el tamaño medio de elemento hasta valores que no disparen el tiempo de análisis, para seguir refinando en las zonas de interés, logrando un modelo lo más equilibrado posible en tiempo de cálculo. La transición de malla basta a malla más fina debe ejecutarse de forma gradual.

En análisis no lineales, el tamaño del elemento puede afectar directamente a la convergencia del método numérico de resolución.

3.2.5. CALIDAD DE MALLA

Se establecen unos ratios para controlar la calidad de la malla, es decir, la forma geométrica que presentan los elementos. Esta calidad impacta directamente en la solución del análisis, por lo que es muy importante establecer un control de calidad de malla antes de ejecutar un cálculo.

Los 4 ratios de calidad más relevantes para análisis estáticos estructurales son: *Aspect Ratio* (relación entre longitudes de aristas del elemento), *Warping* (para un elemento Shell, es la desviación en posición de cualquier nodo versus el plano que forman los otros 3), *Skewness* (control de medida de los ángulos entre aristas adyacentes) y *Tapering* (relacionado con la forma *taper* que adopta el elemento Shell). Añadir el control de ángulos y el Jacobiano para elementos sólidos [81]. Estos ratios se calculan de forma distinta según el código numérico; un mismo ratio resulta más restrictivo calculado mediante un software que respecto a otro. No obstante, los controles de calidad son muy similares.

Debe añadirse el control de Longitud máxima de arista de elemento, el de Longitud mínima de arista, y el % de elementos triangulares (además del control visual de saturación de estos elementos en una determinada zona de interés).

3.2.6. COEFICIENTE DE FRICCIÓN

El coeficiente de fricción entre el material de estudio y el acero del indentador de la probeta en el ensayo puede afectar a la respuesta. Este factor puede influir en la diferencia de resultados entre test y cálculo, cuando se realiza el ejercicio de validación o en la técnica de iteraciones de ajuste de parámetros del modelo constitutivo (etapa plástica, impacto, etc.).

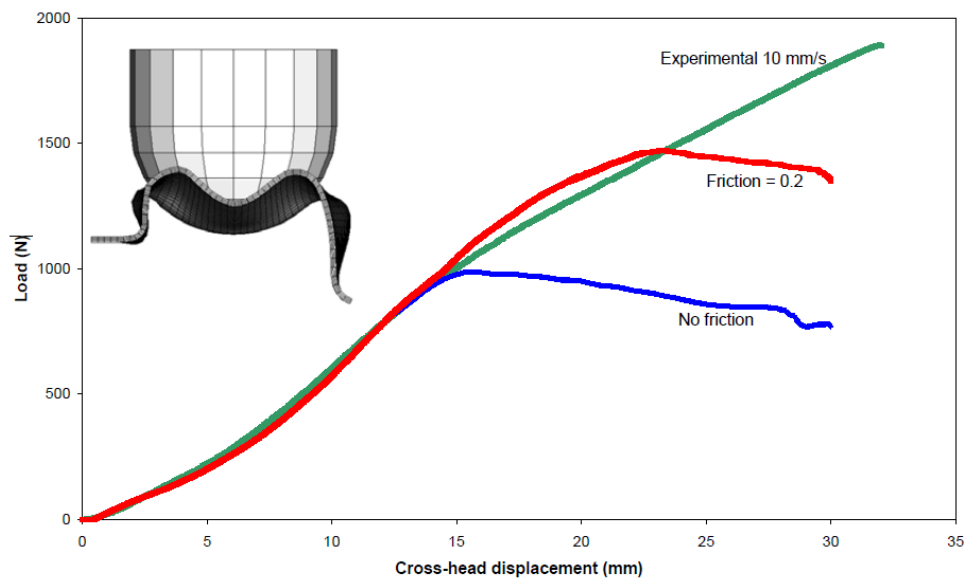


Figura 3.21. Comparativa de la respuesta sobre muestra, mediante simulación, para predecir el efecto del coeficiente de fricción [82]

Arriaga et ál presentan un estudio de sensibilidad de diferentes variables de simulación en la respuesta mediante correlación con test experimental, entre ellas el coeficiente de fricción estático (análisis cuasi-estático) y dinámico (para impacto) [83].

Crocker, en base a la investigación de Dean et ál, muestra sobre un ensayo a compresión-flexión a 10 mm/s, que la introducción de un coeficiente de fricción $\mu=0.2$ acerca mejor la respuesta obtenida en simulación versus test experimental, en comparativa con el análisis sin fricción, (los software MEF suelen presentar esta última opción, por defecto) [84].

3.2.7. RIGIDEZ DEL ELEMENTO DE CONTACTO

Los códigos numéricos permiten establecer leyes de rigidez graduales (*soft contact*) para los elementos de contacto, con el fin de suavizar las fuerzas de interacción que aparecen a lo largo de la simulación, ayudando en algunos casos a obtener un tiempo computacional menor y una mejor convergencia computacional.

En la implementación de elementos de contacto, en Abaqus, con comportamiento blando, puede usarse la ley exponencial (*pressure-overclosure*) presentando buenos tiempos de análisis.

Para esta expresión, el parámetro c_o define la distancia de interacción entre las dos superficies a contactar para iniciarse la ley exponencial de presión, mientras que el parámetro p_o define el segundo punto de paso, a distancia cero entre superficies de contacto, para establecer la curva exponencial.

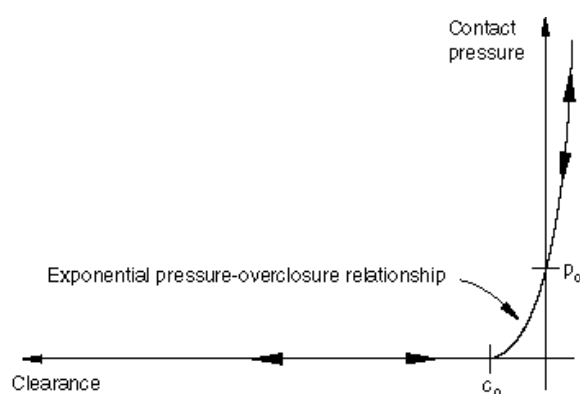


Figura 3.22. Relación presión-cierre, contacto *soft* exponencial en Abaqus[85]

3.3. BIBLIOGRAFIA

- [1] LyondellBasell Industries, “Material data sheet.” 2009.
- [2] L. David, R. Quinson, C. Gauthier, and J. Perez, “The role of anelasticity in high stress mechanical response and physical properties of glassy polymers,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 37, no. 10, pp. 1633–1640, 1997.
- [3] J. Rose, R. A. Duckett, and I. M. Ward, “The yield behaviour of poly (phenylene-bibenzimidazole),” *Journal of Materials Science*, vol. 30, pp. 5328–5334, 1995.
- [4] C. Marano and M. Rink, “Shear yielding threshold and viscoelasticity in an amorphous glassy polymer: a study on a styrene–acrylonitrile copolymer,” *Polymer*, vol. 42, no. 5, pp. 2113–2119, Mar. 2001.
- [5] D. I. Bower, *An introduction to Polymer Physics*, 1st. Edit. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [6] L. H. Sperling, *Introduction to Physical Polymer Science*, 4th. Edit. Hoboken: While-Interscience. John Wiley&Sons, 2006.
- [7] H. F. Brinson and L. C. Brinson, *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*, 1st. Edit. New York: Springer-Verlag, 2008.
- [8] “UNE-EN ISO 527-1. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.” AENOR, Madrid, 2012.
- [9] J. Lord, M. Loveday, M. Rides, and I. McEnteggart, “TENSTAND WP2 Final Report: Digital tensile software evaluation,” NPL Materials Centre, National Physical Centre, Teddington, 2005.
- [10] “DIN 53455 Testing of Plastics Standards.”
- [11] ASTM International, “Standard test method for tensile properties of plastics,” 2003.
- [12] Celanese, “Ticona Engineering Polymers. Material data sheet.” 2010.
- [13] M. Alves and N. Jones, “Influence of hydrostatic stress on failure of axisymmetric notched specimens,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 47, no. 3, pp. 643–667, Mar. 1999.
- [14] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd. Edit. New-York: McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [15] P. W. Bridgman, *Studies in large plastic flow and fracture: with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure*. Cambridge: Harvard University Press, 1964.

- [16] J. C. Earl and D. K. Brown, "Distributions of stress and plastic strain in circumferentially notched tension specimens," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 8, no. 4, pp. 599–602, 1976.
- [17] J. Aronofsky, "Evaluation of stress distribution in the symmetrical neck of flat tensile bars," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 75–84, 1951.
- [18] V. Tvergaard, "Necking in tensile bars with rectangular cross-section," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 103, no. 1–2, pp. 273–290, Mar. 1993.
- [19] G. Le Roy, J. D. Embury, G. Edwards, and M. F. Ashby, "A model of ductile fracture based on the nucleation and growth of voids," *Acta Metallurgica*, vol. 29, no. 8, pp. 1509–1522, Aug. 1981.
- [20] A. R. Ragab, "Prediction of ductile fracture in axisymmetric tension by void coalescence," *International Journal of Fracture*, vol. 105, pp. 391–409, 2000.
- [21] G. La Rosa, G. Mirone, and A. Risitano, "Postnecking elastoplastic characterization: Degree of approximation in the Bridgman Method and properties of the flow-Stress/true-Stress Ratio," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 34, pp. 615–624, 2003.
- [22] Z. L. Zhang, M. Hauge, J. Ødegård, and C. Thaulow, "Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 36, no. 23, pp. 3497–3516, Aug. 1999.
- [23] Y. Ling, "Uniaxial true stress-strain after necking," *AMP Journal of Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 37–48, 1996.
- [24] J. M. Choung and S. R. Cho, "Study on true stress correction from tensile tests," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 22, no. 6, pp. 1039–1051, Jul. 2008.
- [25] C. A. Pampillo and L. A. Davis, "Temperature dependence of the yield and flow stresses of linear high-molecular-weight polyethylene," *Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 11, pp. 4277–4285, 1972.
- [26] S. Bahadur, "Strain hardening equation and the prediction of tensile strength of rolled polymers," *Polymer Engineering and Science*, vol. 13, no. 4, pp. 266–272, 1973.
- [27] G. Dean and B. Read, "Modelling the behaviour of plastics for design under impact," *Polymer Testing*, vol. 20, no. 6, pp. 677–683, 2001.
- [28] B. C. Duncan and A. Pearce, "Comparison of impact and high rate tests for determining properties of adhesives and polymers needed for design under impact loading." NPL Report CMMT (A) 134, Teddington, 1999.

- [29] P. Duffo, B. Monasse, J. M. Haudin, C. G'Sell, and A. Dahoun, "Rheology of polypropylene in the solid state," *Journal of Materials Science*, vol. 311, no. 30, pp. 701–711, 1995.
- [30] R. N. Haward, "Strain hardening of thermoplastics," *Macromolecules*, vol. 26, no. 22, pp. 5860–5869, 1993.
- [31] W. Michaeli and M. Glibmann, "Concept for the numerical description of the true stress/strain behaviour of semi-crystalline thermoplastics," *Polymer Testing*, vol. 20, no. 5, pp. 591–596, 2001.
- [32] M. Jerabek, Z. Major, and R. W. Lang, "Uniaxial compression testing of polymeric materials," *Polymer Testing*, vol. 29, no. 3, pp. 302–309, May 2010.
- [33] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 5th. Edit. Singapore: Prentice Hall, 2008.
- [34] A. Arriaga, J. M. Lazkano, R. Pagaldai, A. M. Zaldua, R. Hernandez, R. Atxurra, and A. Chrysostomou, "Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS," *Polymer Testing*, vol. 26, no. 3, pp. 284–305, May 2007.
- [35] C. J. Ribeiro and J. C. Viana, "Optimization of injection moulded polymer automotive components," in *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*, 1st. Edit., Obtenido de: <http://www.intechopen.com/books>, 2011, pp. 65–100.
- [36] M. Ericson and L. Berglund, "Deformation and fracture of glass-mat-reinforced polypropylene," *Composites Science and Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 269–281, 1992.
- [37] S. Glaser and A. Wüst, "Integrative crash simulation of composite structures: the importance of process induced material data," in *4rd German LS-DYNA Forum, Bamberg*, 2005.
- [38] M. Denac, V. Musil, I. Šmit, and F. Ranogajec, "Effects of talc and gamma irradiation on mechanical properties and morphology of isotactic polypropylene/talc composites," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 82, no. 2, pp. 263–270, 2003.
- [39] K. Engelsing and G. Menning, "Influence of the injection molding process on the free volume and its effect on the creep behavior of styrene- acrylonitrile copolymer," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 5, no. 1, pp. 27–38, 2001.
- [40] C.-N. Huang and C.-C. Chang, "Determination of optimal manufacturing parameters for injection mold by inverse model basing on MANFIS," *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, vol. 2, pp. 28–35, 2010.

- [41] A. Gordillo Aubert, “Influencia de la inyección sobre el comportamiento mecánico de compuestos de polipropileno,” Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [42] M. Rides and G. Dean, “Evaluation of mould designs for preparing standard plate specimens of plastics by injection moulding.” NPL Report CMMT (A) 30, Teddington, 1996.
- [43] G. Guerrica-Echevarría, J. I. Eguiazábal, and J. Nazábal, “Influence of molding conditions and talc content on the properties of polypropylene composites,” *European Polymer Journal*, vol. 34, no. 8, pp. 1213–1219, 1998.
- [44] T. Boronat, “Estudio y modelización de la procesabilidad mediante moldeo por inyección de materiales termoplásticos reciclados,” Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [45] P. E. Tomlins, “Predicting and controlling the dimensional stability of injection moulded plastic parts.” NPL Report CMMT (A) 60, Teddington, 1996.
- [46] P. E. Tomlins, “Shrinkage and warpage of moulded thermoplastics: A survey of the industries problems and needs.” NPL Report CMMT, Teddington, 1996.
- [47] R. J. Crawford, *Plastics Engineering*, 3rd. Edit. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [48] A. Kumar and R. K. Gupta, *Fundamentals of polymer engineering*, 2nd. Edit. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [49] Dupont, “Material data sheet.” 2010.
- [50] Styrolution, “Material data sheet.” 2010.
- [51] F. Huberth, S. Hiermaier, and M. Neumann, “Material models for polymers under crash loads existing LS-DYNA models and perspective,” in *LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg*, 2005.
- [52] K. Knapp II, G. A. Gabriele, and D. Lee, “Stress-Strain response of polymers for predicting the behavior of integral fasteners,” *CiteSeerx Scientific Literature Digital Library and Search Engine*. 2009.
- [53] S. Mönnich, F. Becker, and B. Fellner, “Comparison of material models for crash simulation-experimental and simulation work,” in *8th European LS-DYNA Users Conference. Strassbourg*, 2011.
- [54] X. S. Xiao and M. Leach, “Intermediate and high strain rate tensile testing of plastic materials,” in *SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, 2005.

- [55] M. Zrida, H. Laurent, V. Grolleau, G. Rio, M. Khelif, D. Guines, N. Masmoudi, and C. Bradai, "High-speed tensile tests on a polypropylene material," *Polymer Testing*, vol. 29, no. 6, pp. 685–692, Sep. 2010.
- [56] S. Fu, Y. Wang, and Y. Wang, "Tension testing of polycarbonate at high strain rates," *Polymer Testing*, vol. 28, no. 7, pp. 724–729, Oct. 2009.
- [57] A. D. Drozdov, "Time-dependent response of polypropylene after strain reversal," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, no. 24, pp. 3221–3233, Dec. 2010.
- [58] Q.-Z. Fang, T. J. Wang, H. G. Beom, and H. P. Zhao, "Rate-dependent large deformation behavior of PC/ABS," *Polymer*, vol. 50, no. 1, pp. 296–304, Jan. 2009.
- [59] G. Dean and R. Mera, "Determination of material properties and parameters required for the simulation of impact performance of plastics using finite element analysis," no. July. NPL Report DEPC-MPR 007, Teddington, 2004.
- [60] J. Bergström, "Calculation of Prony series parameters from dynamic frequency data," pp. 4–5, 2005.
- [61] A. D. Drozdov, "Chapter 2 - Constitutive Models in Linear Viscoelasticity BT - Viscoelastic Structures," Burlington: Academic Press, 1998, pp. 25–106.
- [62] J. M. Gere and S. P. Timoshenko, *Mecánica de Materiales*, 2.^a ed. México: Grupo Editorial Iberoamericano, 1986.
- [63] L. Ortiz Berrocal, *Resistencia de Materiales*, 3.^a ed. Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- [64] G. E. Schoolenberg and P. Vink, "Ultra-violet degradation of polypropylene: 1. Degradation profile and thickness of the embrittled surface layer," *Polymer*, vol. 32, no. 3, pp. 432–437, 1991.
- [65] K. T. Gillen, J. Wise, and R. L. Clough, "General solution for the basic autoxidation scheme," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 47, no. 1, pp. 149–161, 1995.
- [66] J. Wise, K. T. Gillen, and R. L. Clough, "Quantitative model for the time development of diffusion-limited oxidation profiles," *Polymer*, vol. 38, no. 8, pp. 1929–1944, Apr. 1997.
- [67] L. Tong and J. R. White, "Photo-oxidation of thermoplastics in bending and in uniaxial compression," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 53, no. 3, pp. 381–396, Sep. 1996.
- [68] L. Audouin, V. Langlois, J. Verdu, and J. C. de Bruijn, "Review. Role of oxygen diffusion in polymer ageing: kinetic and mechanical aspects," *Journal of Materials Science*, vol. 29, pp. 569–583, 1994.

- [69] T. J. Turton and J. R. White, “Observation of different photo-degradation behaviour in two similar polypropylenes,” *Journal of Materials Science*, vol. 6, no. 36, pp. 4617–4624, 2001.
- [70] T. J. Turton and J. R. White, “Effect of stabilizer and pigment on photo-degradation depth profiles in polypropylene,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 74, no. 3, pp. 559–568, 2001.
- [71] “Degradación UV y métodos de test relacionados.” Cabot Corporation, Massachussets, U.S.A.
- [72] D. Kockott, “Adjustment and control of weathering conditions in accelerated tests of polymer materials for better correlation,” *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, vol. 137, no. 1, pp. 1–13, 1985.
- [73] D. Kockott, “Natural and artificial weathering of polymers,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 25, no. 2–4, pp. 181–208, 1989.
- [74] NAFEMS, “Training Guides.” 2010.
- [75] J. M. Puigoriol, “Apuntes Postgrado Elementos Finitos en Ingeniería.” Departamento de Ingeniería Industrial. IQS School of Engineering. URL, 2011.
- [76] J. M. Puigoriol, “Junta de estanqueidad perimetral, tramo superior. Análisis hiperelástico.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2008.
- [77] J. M. Puigoriol, “Elementos de fijación. Clip de estanqueidad, Medallón.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2008.
- [78] “ABAQUS Analysis User’s Manual, release 6.8. Volumen IV: Elements.” Abaqus Inc., USA, 2008.
- [79] “ANSYS Element Reference, release12.0.” Ansys, Inc., USA, 2011.
- [80] J. M. Puigoriol, “Rigidez de elementos. Clip 3. Nuevo diseño propuesta P1, test 21.” Faurecia Interior System España, 2008.
- [81] “ANSA v.13.0.2 User’s Guide.” BETA CAE Systems S.A., Greece, 2009.
- [82] G. D. Dean and L. E. Crocker, “Prediction of the impact performance of plastics using finite element methods.” NPL Report, Measurement Good Practice Guide No. 87, Teddington.
- [83] A. Arriaga, R. Pagaldai, A. M. Zaldua, A. Chrysostomou, and M. O’Brien, “Impact testing and simulation of a polypropylene component. Correlation with strain rate sensitive constitutive models in ANSYS and LS-DYNA,” *Polymer Testing*, vol. 29, no. 2, pp. 170–180, Apr. 2010.
- [84] L. Crocker, “Modelling the behaviour of plastics for design under impact. Final Project overview.” Teddington.

- [85] “ABAQUS Analysis User’s Manual, release 6.8. Volumen V: Prescribed Conditions.” Abaqus, Inc., USA, 2008.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA CUASI-ESTÁTICA SIMPLIFICADA PARA MATERIALES TERMOPLÁSTICOS

Se presenta, en base a lo expuesto en los capítulos anteriores, una propuesta que permita en primer lugar, trazar la curva estimada para alimentar el modelo constitutivo de endurecimiento isotrópico de Von Mises, de la forma más simple posible (Etapa 1, Variables Curva). Para esta acción es necesario definir, previamente, una etapa de creación del Factor de Escala Máster para cada material (Etapa 0). Como acciones finales se hará referencia a la selección de aquellas variables ligadas a la simulación computacional (Etapa 1, Variables MEF). Se fijan todos los parámetros posibles para minimizar aquellos que deberán validarse posteriormente, mediante un ejercicio híbrido test-simulación, para lograr la determinación final de la metodología.

4.1. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN

En los dos capítulos anteriores se ha presentado el estado del arte de los modelos constitutivos de carácter simple adecuados para simulación estructural cuasi-estática y el de las variables más relevantes para este tipo análisis, respetando siempre la premisa de simplicidad. Algunas de las decisiones de selección o descarte ya se han realizado en los mismos capítulos, como por ejemplo la elección de la ecuación constitutiva. Una vez identificados los factores más importantes, se está en disposición de establecer la propuesta de la metodología de caracterización.

Se plantea dicha metodología a partir de dos etapas, para su implementación en industria, trazadas de forma secuencial en el tiempo: etapa previa de obtención de los Factores de Escala Máster y etapa de implementación de la metodología en uso habitual (Figura 4.2). Sin embargo, la etapa previa 0 debe prolongarse en el tiempo, a lo largo del desarrollo de los proyectos que realice la empresa donde se quiera implementar, alimentando la base de curvas de muestras recortadas extraídas de componentes, una vez se disponga de éstos. Las acciones pueden resumirse en el siguiente esquema:

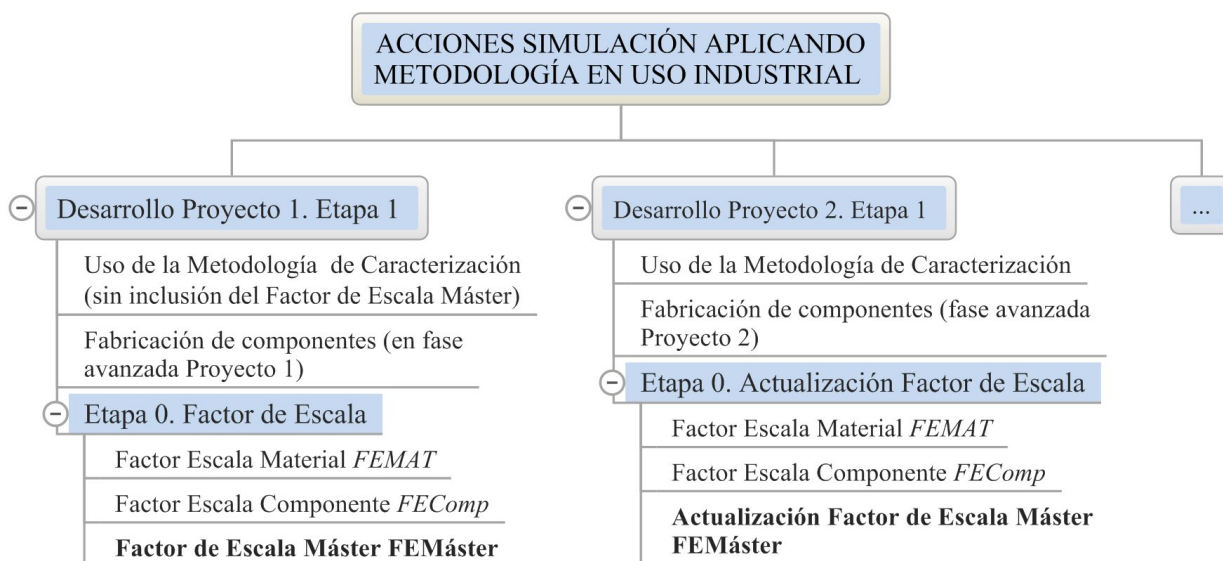


Figura 4.1. Esquema implementación Metodología de caracterización cuasi-estática

Así pues, resulta importante definir de forma unívoca, en la etapa previa 0, el Factor de Escala Máster para cada familia para poder realizar la corrección de las curvas debido al proceso de inyección.

El siguiente diagrama muestra las dos etapas citadas. Se agrupan las variables

influyentes en la etapa de uso de la metodología según su influencia directa sobre la curva (Variable Curva) o sobre la simulación estructural (Variable MEF).



Figura 4.2. Esquema propuesta Metodología de Caracterización Cuasi-estática

Si bien es posible en la práctica, usar la metodología sin alguna de las variables propuestas, la bondad de la respuesta quedará afectada por aquellas no consideradas, algunas de mayor influencia que otras.

En el siguiente capítulo se lleva a cabo el caso práctico de la propuesta sobre la empresa *Faurecia Interior Systems* Abrera, obteniéndose los Factores de Escala Máster para las familias PPT y ABS (Etapa 0), para posteriormente, mediante correlación test-simulación, validar la propuesta de la metodología (capítulo 6, Etapa 1) y realizar una verificación (capítulo 7, Etapa 1).

4.2. ETAPA 0. FACTOR DE ESCALA

Para contemplar la caída de propiedades debido al proceso de inyección de la pieza, la curva debe reducirse mediante un valor: Factor de Escala Máster de la familia de materiales, $FE_{Máster}$. Este factor debe obtenerse mediante la extracción de probetas recortadas de piezas, de la misma forma que se realiza en el siguiente capítulo, a modo de ejemplo, para 4 materiales.

4.2.1. FACTOR DE ESCALA PARA UN MATERIAL, FE_{Mat}

Para un componente seleccionado de un material de una familia, se dispondrá de un número de 2 piezas y de cada pieza se realizará la extracción de muestras en 4 o 5 zonas, según posibilidades que ofrezca el diseño. A partir de la media de todos los datos obtenidos de las dos piezas (curva media del componente) se realizará la comparativa del valor de la tensión máxima respecto a su curva ideal. Se establecerá como factor de reducción de un material FE_{Mat-i} , en %, el valor:

$$FE_{Mat-i}(\%) = \frac{\sigma_{\max, \text{Ideal}} - \sigma_{\max, \text{Recort}}}{\sigma_{\max, \text{Ideal}}} \cdot 100$$

Ecuación 4.1

donde $\sigma_{\max, \text{Ideal}}$ es la tensión máxima de la curva de la probeta ideal y $\sigma_{\max, \text{Recort}}$ el valor extraído de la curva media del material (datos de probetas recortadas).

En el caso de disponer de más de un componente distinto fabricado con el mismo material, se establecerá el FE_{Mat-i} (%) como media de la reducción obtenida para cada componente j del mismo material, FE_{Comp-j} (%). Esta reducción por componente se realizará siguiendo la fórmula anterior. La media aritmética FE_{Mat-i} (%) resulta:

$$FE_{Mat-i}(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n FE_{Comp-j}(\%)$$

Ecuación 4.2

Finalmente, en el caso de disponer de un mismo componente fabricado con el mismo material en distintas inyecciones, se realizará la media del factor de escala de componente FE_{Comp-j} (%) teniendo en cuenta cada inyección $FE_{Comp-j, \text{iny-k}}$ (%):

$$FE_{Comp-j}(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n FE_{Comp-j,iny-k}(\%)$$

Ecuación 4.3

Este valor se introduciría en la Ecuación 4.2 para realizar la media con los otros componentes.

4.2.2. FACTOR DE ESCALA MÁSTER, $FE_{Máster}$

Para una familia de materiales, se llevará a cabo el cálculo del factor de escala del material utilizando 2 o más componentes distintos.

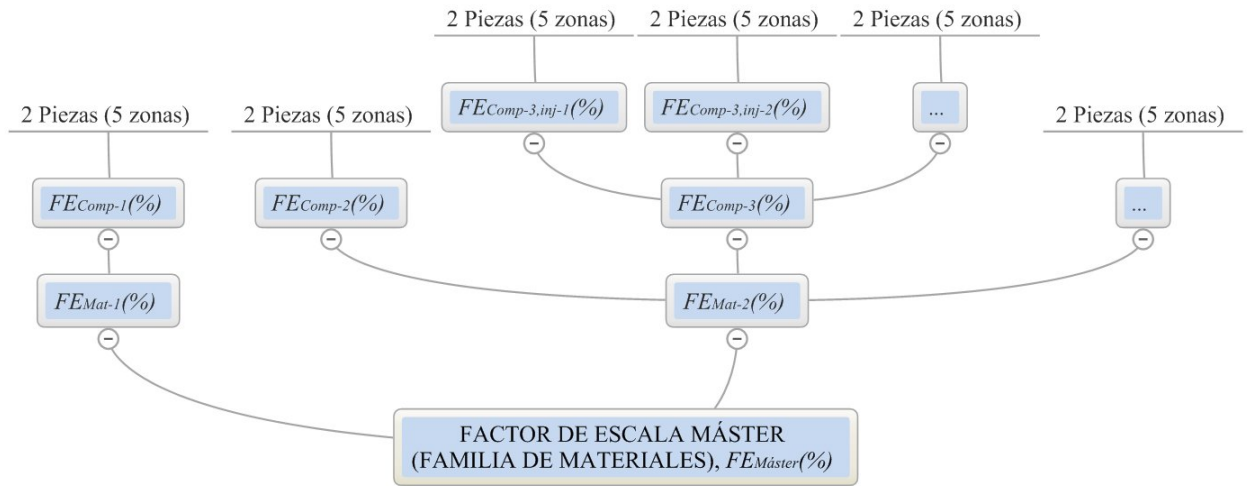


Figura 4.3. Esquema Factor de Escala Máster

En el caso que se disponga de un número elevado de componentes de otros proyectos (en línea de producción), se realizará la selección teniendo en cuenta la elección de distintos materiales de la misma familia, de formas distintas de los componentes y con procesos de llenado de molde suficientemente diferentes.

Una vez obtenido el factor de escala por material, FE_{Mat-i} , se realizará la media hallándose el valor de reducción para la familia, en %:

$$FE_{Máster}(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n FE_{Mat-i}(\%)$$

Ecuación 4.4

4.3. ETAPA 1. USO METODOLOGÍA

4.3.1. VARIABLES RELACIONADAS CON LA DEFINICIÓN DE LA CURVA

Se agrupan bajo este concepto aquellos parámetros relacionados con la definición de la curva, que afectan directamente a ésta.

1. Temperatura

Como se ha presentado en el capítulo anterior, la temperatura marca de forma significativa el trazo de la curva tensión-deformación para un material termoplástico. Resulta importante fijar esta variable para cada situación de estudio.

Muchos de los ensayos que se realizan sobre diseño de producto se efectúan a temperatura ambiente. Esta temperatura suele estar comprendida entre los 20°C y 25°C.

Para aquellos casos con valores distintos a esta temperatura de referencia, la presente metodología puede resultar válida, pero deben revisarse algunos de los otros parámetros, que podrían verse modificados (Factor de Escala Máster, coeficiente de fricción). El presente estudio no valida la metodología a temperaturas distintas de la ambiente.

No se considera el uso de ecuaciones constitutivas que implementan directamente esta variable, como por ejemplo aquellas que contemplan la ecuación de Williams-Landel-Ferry o la de Arrhenius [1–3].

2. Velocidad de deformación

Parámetro presentado en el capítulo anterior, con fuerte influencia sobre la curva. Para la presente metodología se consideran bajas velocidades (1mm/min, 5mm/min) representativas del comportamiento cuasi estático.

Se descarta el uso de cualquier modelo constitutivo con sensibilidad a la velocidad de deformación, tales como el viscoelástico o el viscoelastoplástico [4–6], por razones de simplicidad en la obtención de los parámetros de caracterización del material y tiempos computacionales.

3. Lectura mediante extensómetro

La curva elastoplástica obtenida mediante el ensayo en la máquina universal puede realizarse con un solo extensómetro, siendo suficientemente válido el mecánico

mediante contacto (clip).

4. Tipo test en máquina universal para caracterización del material

Se realizará el test a tracción descartándose el ensayo de flexión a tres o cuatro puntos, para la obtención de la curva elastoplástica. El test de flexión se caracteriza por presentar la matriz tensión distinta para cada fibra de la muestra de ensayo.

5. Determinación del Límite de Fluencia de Cálculo σ_{yC} . Factor límite de fluencia $F_{\sigma y}$

Este punto define la pendiente en la zona elástica (Módulo elástico de cálculo E_{TC}), y supone un compromiso moderado de reducción del límite de fluencia, para la fragmentación de la parte elástica de la plástica.

Se establece como valor de trabajo la reducción de la tensión máxima debido al proceso de inyección. En consecuencia, el Factor Límite de Fluencia $F_{\sigma y}$ se calcula como:

$$F_{\sigma y}(\%) = F_{Máster}(\%)$$

Ecuación 4.5

A partir del punto $\sigma_{Máx}$ se busca el valor del Límite de Fluencia de Cálculo σ_{yC} , utilizando la reducción del factor $F_{\sigma y}$.

6. Corrección a valores verdaderos

Corrección de la curva para obtener los valores verdaderos mediante las Ecuaciones 3.3 y 3.4. Esta modificación debe realizarse a partir del punto de fluencia de cálculo.

Se descarta la aplicación de la variación del coeficiente de Poisson al requerir doble lectura del extensómetro en máquina universal. La estimación mediante las Ecuaciones 3.7 y 3.15 se omite por presentar baja sensibilidad en la respuesta.

7. Corrección de la curva verdadera más allá del punto máximo

Para la selección del modelo de corrección del tramo de endurecimiento, se llevará a cabo un test de sensibilidad mediante el ejercicio híbrido test-simulación. En concreto se evaluarán el modelo clásico presentado en la Ecuación 3.13 (modelo *Endurec1*) y el modelo exponencial cuadrático mostrado en la Ecuación 3.14 (modelo *Endurec2*). Esta corrección debe establecerse más allá del límite $\sigma_{Máx}$. En los dos casos es necesario

modificar las pendientes negativas, para aquellos puntos que sea necesario. Si no se aplica ninguna ley, también debe realizarse (modelo pendientes positivas).

4.3.2. VARIABLES RELACIONADAS CON LA SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

Se redactan aquellas variables relacionadas con el Método de los Elementos Finitos.

a. Selección del modelo constitutivo elastoplástico

Tal y como se ha comentado en el capítulo 2 se realiza la elección del modelo de Von Mises para piezas inyectadas de plástico con el fin de agilizar al máximo la caracterización, descartándose tanto el modelo Druker-Prager como el de cavitación, que requieren de segundos ensayos para obtener los datos del material. Como regla de endurecimiento se selecciona el modelo isotrópico, adecuado para materiales plásticos, y la asociada como regla de flujo, porque suele ser la implementada en los códigos numéricos para acompañar a los modelos constitutivos clásicos para metales.

b. Tipo de elemento

La selección del tipo de elemento suele estar condicionada por el tamaño total del ensamblaje y por el tipo de análisis a realizar. En la industria es habitual intentar el uso de un mismo modelo MEF para distintas simulaciones (estáticas y dinámicas), y si es posible a distintas escalas (escala global y de detalle). Este concepto responde a la estrategia de modelo único: un solo modelo MEF común para la mayor parte de simulaciones a llevar a cabo, aceptándose el error debido a esta estandarización.

Siguiendo esta filosofía y en el caso de piezas de plástico, para un enfoque global, debe modelarse mediante elementos tipo Shell, para un tamaño de modelo viable computacionalmente (en función del número total de nodos). El trabajo previo de manipulación de la geometría de apoyo para la generación automática de elementos es muy costoso. Este hecho enfatiza la estrategia de modelo único, minimizando el número de modelos a crear.

Tan solo en pocos casos se implementará al detalle mediante elementos tipo Solid, como modelos secundarios que acompañan al global.

c. Grado de elemento

Para las simulaciones de detalle, se usará el elemento piramidal triangular de 4 nodos (TETRA4), teniendo cuidado de escoger un tamaño de arista muy pequeño por ser su

formulación de primer orden. Este elemento se adapta perfectamente a cualquier volumen a mallar, por lo que resulta más sencillo su implementación que el elemento hexaédrico de 8 nodos (HEXA8), con un trabajo previo de preparación de malla muy razonable.

Para simulaciones de escala global, siguiendo la filosofía de modelo único, se implementará el elemento placa de 4 nodos (QUAD4), minimizando los elementos degenerados a 3 nodos (TRIAD3), pero inevitables en geometrías de cierta complejidad.

d. Densidad de malla

Tal como se ha presentado en el capítulo anterior, debe establecerse en base a la experiencia, un tamaño de arista de elemento medio como referencia de trabajo. Algunos *softwares* permiten introducir este control (longitud máxima y mínima) como parámetro de calidad de malla. Tanto la escala (global o de detalle) como el dominio (delimitación del modelo y su entorno) que se esté tratando determinarán este valor. Una vez efectuado la malla para varias piezas de un ensamblaje, es necesario estimar el nivel final de nodos que se obtendrá, aproximadamente. Una vez logrado el conjunto ensamblado será necesario validar el volumen total del fichero obtenido, disminuyendo o aumentando el número de elementos en función de la capacidad computacional que se disponga en el servidor de cálculo. En una industria determinada, mediante referencia a los proyectos anteriores desarrollados, la estimación inicial suele resultar acertada.

e. Calidad de malla

Sea cual sea el dominio y la escala de proyecto, debe asegurarse la calidad de malla mediante los ratios de calidad: *Aspect Ratio*, *Warping*, *Skewness*, *Tapering*, Jacobiano, Control de ángulos y % de elementos triangulares.

f. Coeficiente de fricción

Con el fin de evaluar la sensibilidad de este parámetro, en el siguiente capítulo se realizará un ejercicio de sensibilidad frente a este parámetro mediante el modelo de Coulomb estático y con valores de μ de 0.25, 0.35, niveles de fricción habituales en industria para una interacción entre superficies de acero y plástico. Se añade un análisis con $\mu=0.5$ para completar el estudio.

g. Rigidez del elemento de contacto

También se implementará el modelo de rigidez exponencial de *Abaqus* en la fase de validación de la presente tesis (capítulo siguiente, modelo Tapa Asidero), con valores asignados de $c_0=0.001$ mm y $p_0=1$ MPa. Este modelo suele presentar un buen comportamiento computacional.

4.4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN, VARIABLE CURVA

A continuación, se muestra la propuesta de caracterización sobre un ejemplo, referente a la modificación de la curva elastoplástica. Se utiliza como apoyo, una de las primeras curvas obtenidas de probeta recortada para el material PPT16a, uno de los 4 materiales de estudio de la presente investigación. En base a los resultados obtenidos que se presentan en el próximo capítulo, se aplicará el ajuste final mediante el factor FE_{Master} .

Si bien este ejercicio no representa un caso práctico de validación total de la metodología, el ejemplo permite contrastar la curva obtenida versus la de muestra recortada. El ejercicio expone la estimación del módulo de cálculo E_{TC} a partir de la definición de la división de la curva entre parte elástica y plástica. En definitiva ayuda a entender el punto 5 presentado con anterioridad; determinación del Límite de Fluencia de Cálculo σ_{yC} .

Para la manipulación se parte de la Curva Ideal, extraída de probeta ideal (en rojo). En este caso la curva se ha recibido del proveedor. Otra posibilidad es la obtención mediante probetas ideales en máquina universal (muestras de proveedor o fabricadas inyectando en molde a partir de material en granza).

Partiendo de esta curva debe obtenerse la curva estimada de cálculo (verde) lo más semejante a la extraída de pieza (Curva Recortada azul), bajo la hipótesis que no se dispone de ningún dato de material inyectado. Una comparativa final entre ambas curvas (verde y azul) mostrará la aproximación de la metodología presentada, referente al parámetro Límite de Fluencia de Cálculo.

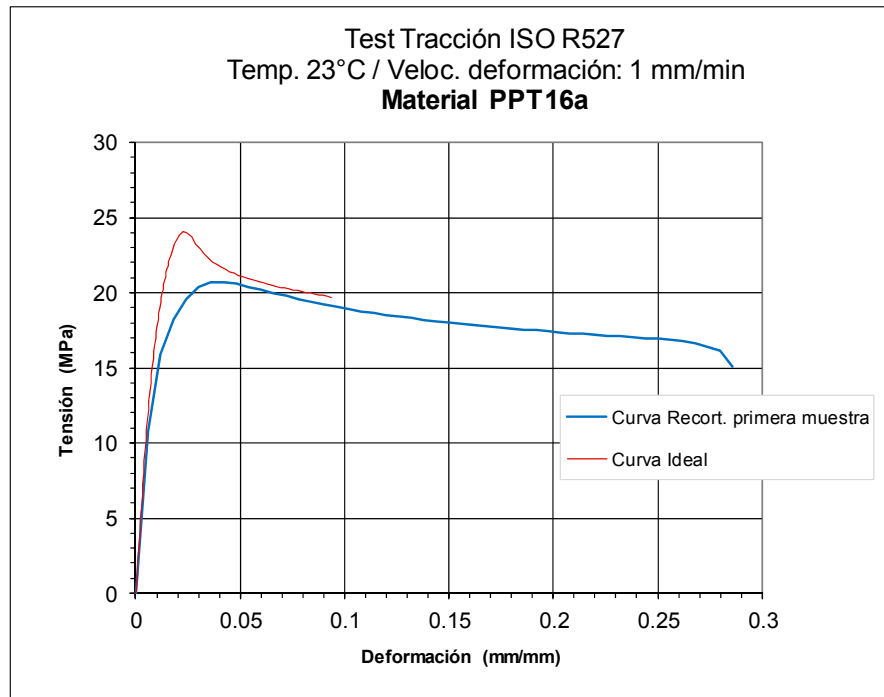


Figura 4.4. Curva Ideal versus Curva Recortada primera muestra, material de estudio PPT16a

Se realizan los siguientes pasos:

1. Reducción de la curva mediante FE_{Master} . Curva Ideal Reducida.

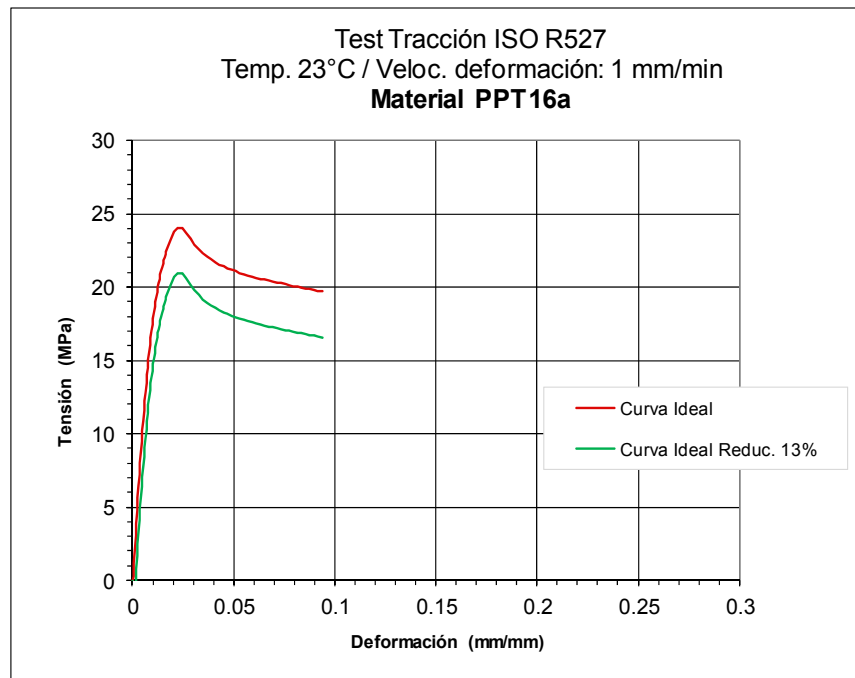


Figura 4.5. Curva Ideal versus Curva Ideal Reducida, material de estudio PPT16

Mediante la comparativa entre la Curva Ideal y la Curva Recortada, puede apreciarse una disminución de la tensión máxima de 3,2 MPa (Figura 4.4). Esto supone un 13% de disminución del máximo.

Para este ejemplo, como no se dispone del Factor de Escala Máster $FE_{Máster}(\%)$, se utiliza el 13% de la caída de propiedades (de 24 MPa a 21.09 MPa). La curva resultante puede verse en la Figura 4.5.

2. Estimación del límite de fluencia de cálculo σ_{yc} .

Este punto marca la pendiente en la zona elástica y supone un compromiso moderado de reducción del límite de fluencia, para la fragmentación de la parte elástica respecto la plástica.

Se establece siempre como procedimiento de determinación de la σ_{yc} el factor de escala $FE_{Máster}$. La tensión de fluencia de cálculo σ_{yc} resulta:

$$\sigma_{yc} = \sigma_{Máx Reduc} - \sigma_{Máx Reduc} \cdot FE_{Máster} (^\circ / 1)$$

Ecuación 4.6

En este caso, buscando la ordenada que representa un valor del 13% menor, se obtiene el límite de fluencia de cálculo estimado (18.5 MPa).

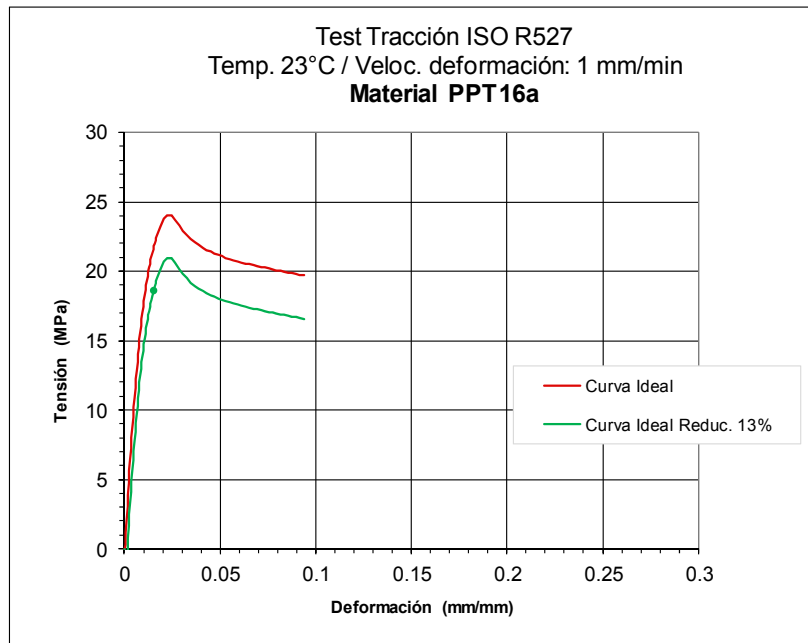


Figura 4.6. Determinación de σ_{yc} , material de estudio PPT16a

Este límite de fluencia estimado implica una pendiente muy razonable en la etapa elástica, que presenta un buen ajuste respecto a la curva azul en toda esta zona (Figura 4.7).

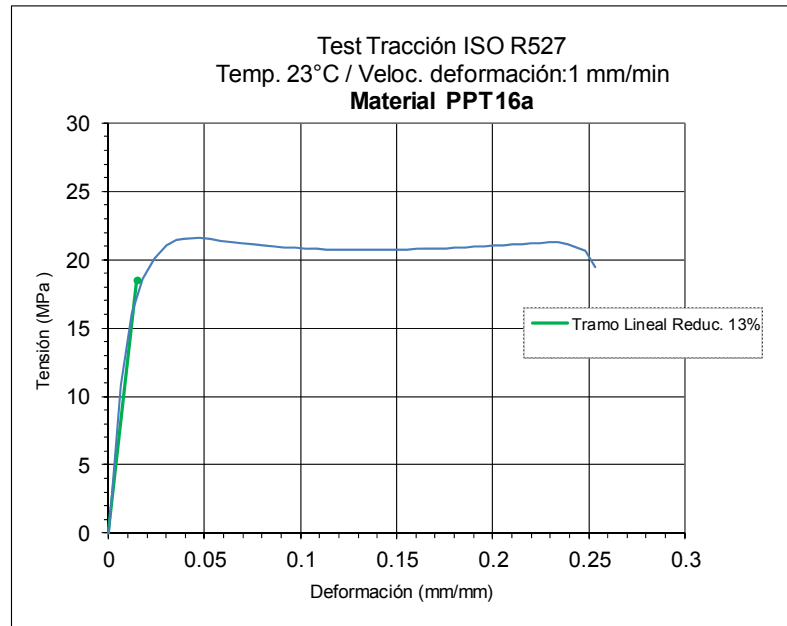


Figura 4.7. Comparativa Tramo lineal versus Curva Recortada, PPT16a

3. Corrección de la curva Ideal Reducida, zona plástica, a valores verdaderos.

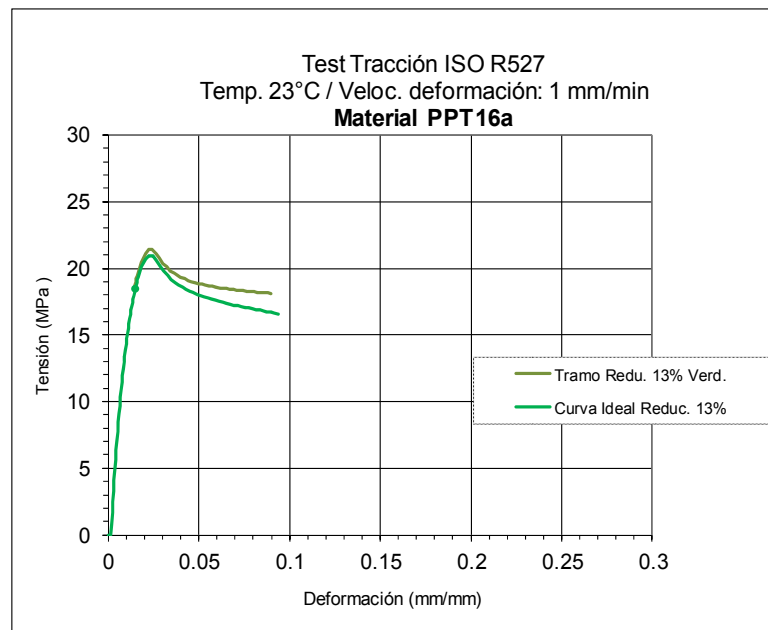


Figura 4.8. Corrección a valores verdaderos del Tramo Elastoplástico, PPT16a

4. Corrección de la etapa de endurecimiento.

Más allá de la etapa de endurecimiento, se realizan 3 modificaciones posibles a evaluar, según familia de material contemplado.

4.a. Corrección a pendientes positivas

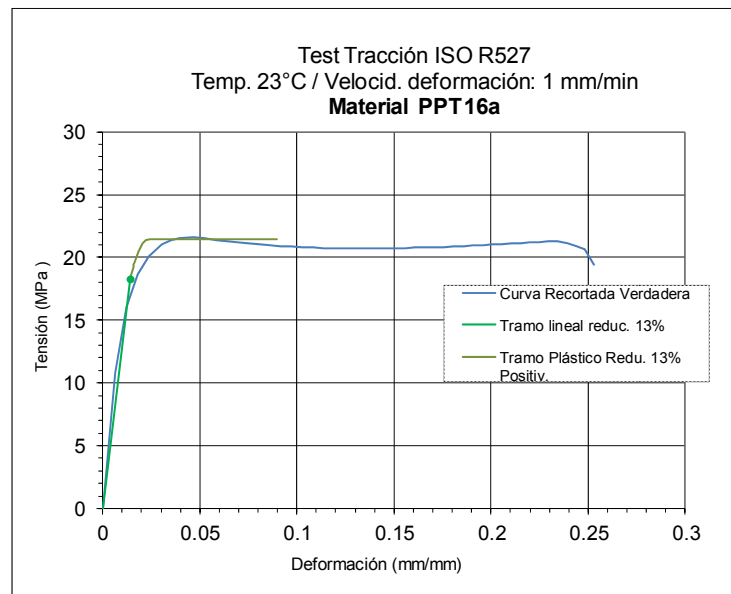


Figura 4.9. Curva de cálculo estimada, corrección a valores positivos, PPT16a

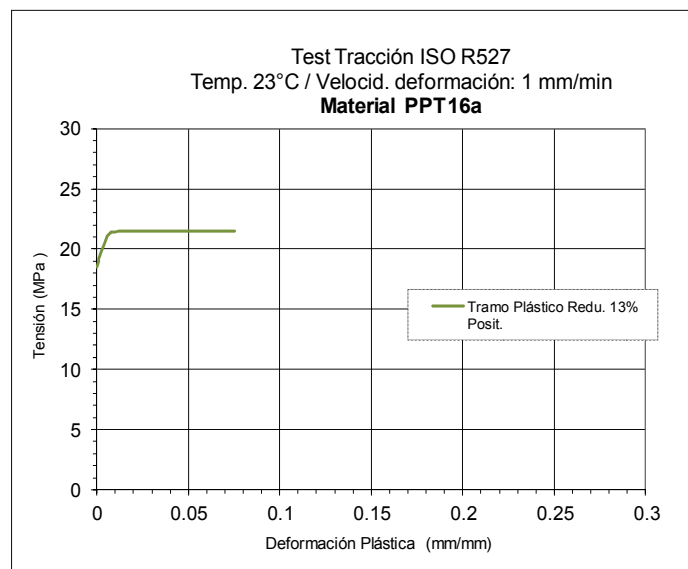


Figura 4.10. Curva elastoplástica Positiva con valores de deformación plástica, para usar en código numérico. Material PPT16a

Siempre es necesario que los valores más allá del límite máximo no muestren pendientes locales negativas, para evitar los problemas de singularidad numérica, aun no aplicando ninguna corrección para esta zona.

En muchos códigos numéricos se requiere introducir la parte elastoplástica como deformaciones plásticas, para el tramo no lineal. En este caso, se obtiene la curva desplazada sobre el gráfico hasta la abscisa 0, imponiendo:

$$\varepsilon_{Plast.} = \varepsilon - \frac{\sigma_{yc}}{E}$$

Ecuación 4.7

En consecuencia, las deformaciones que se muestran en la Figura 4.10 son las plásticas.

4.b. Corrección mediante regla de endurecimiento lineal, *Endurec1*

En este caso y para este material, la regla de endurecimiento presenta la tendencia de la Figura 4.11.

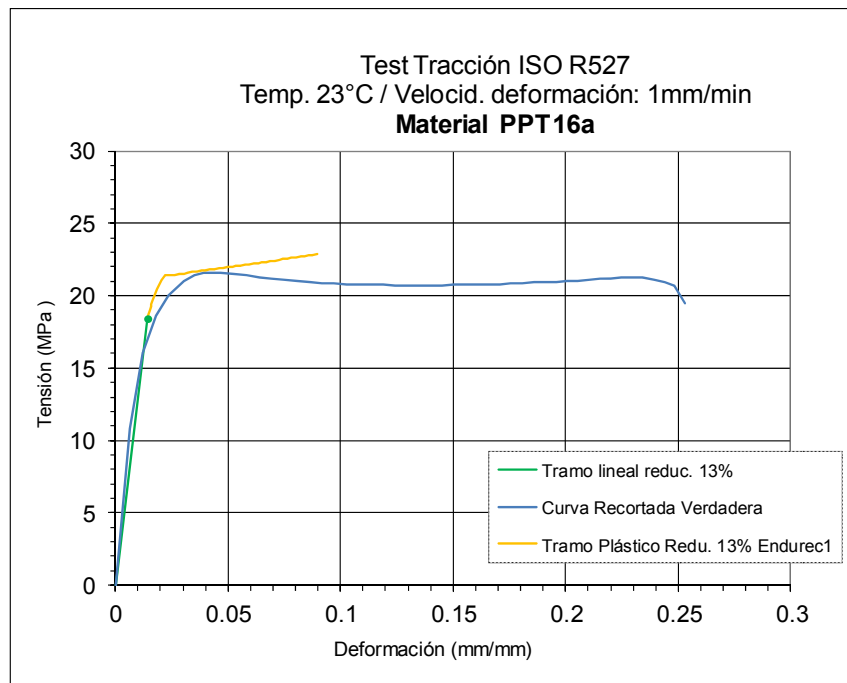


Figura 4.11. Curva elastoplástica con endurecimiento lineal. Material PPT16a

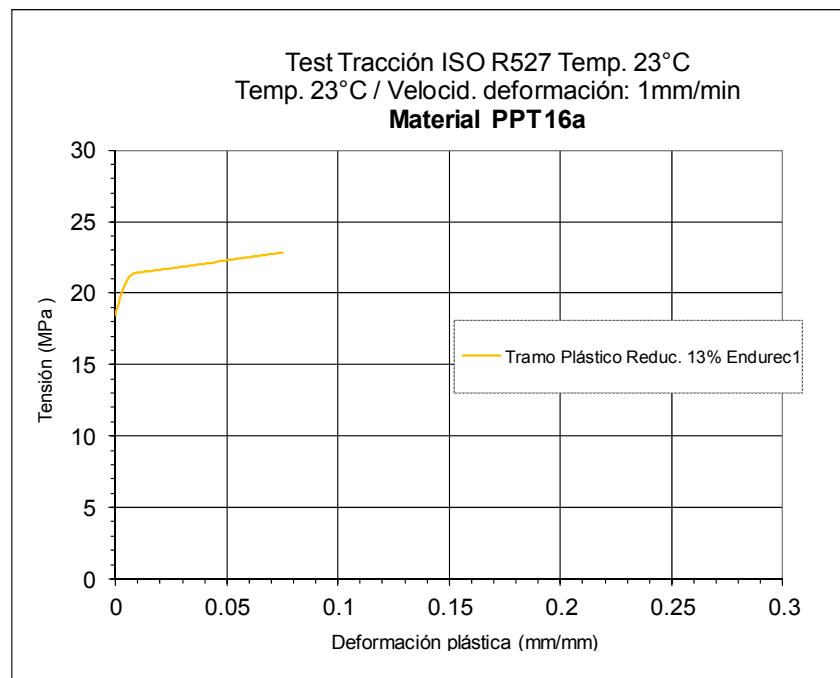


Figura 4.12. Curva con valores de deformación plástica, *Endurec1*. Material PPT16a

4.c. Corrección mediante regla de endurecimiento cuadrática, *Endurec2*

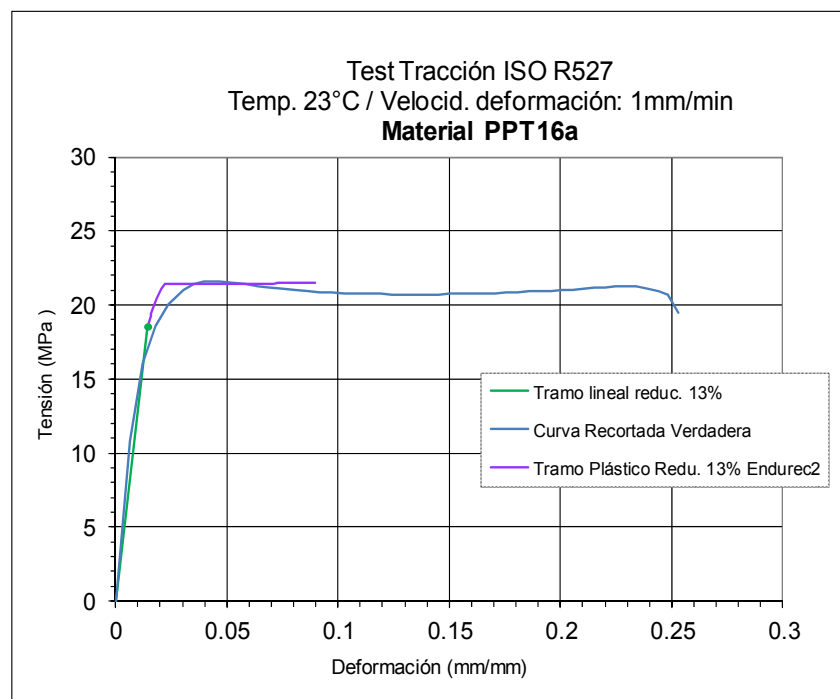


Figura 4.13. Curva elastoplástica con endurecimiento cuadrático. Material PPT16a

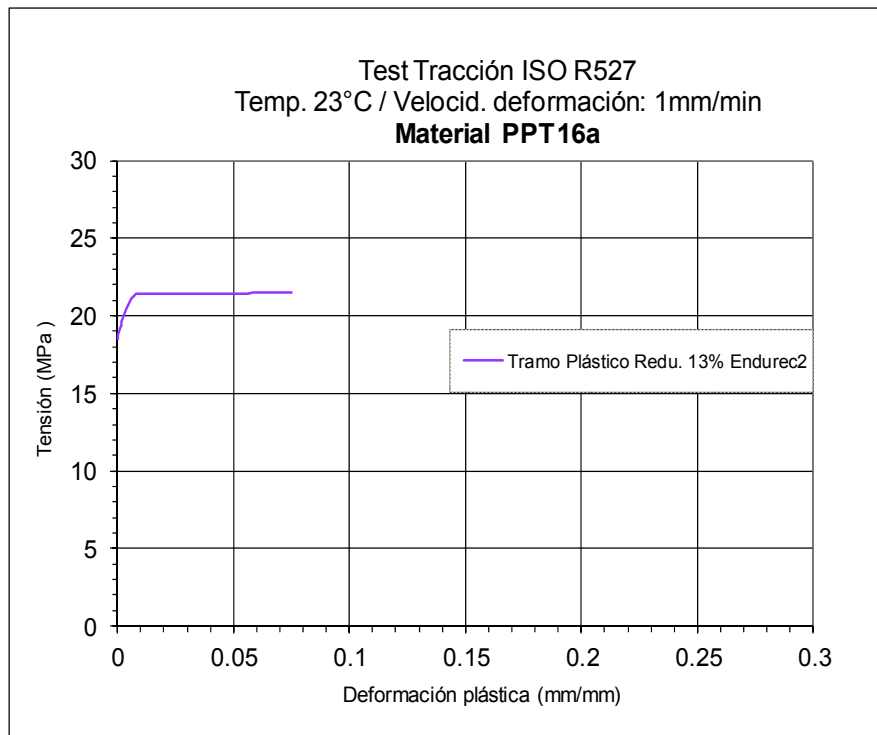


Figura 4.14. Curva con valores de deformación plástica, *Endurec2*. Material PPT16a

La corrección cuadrática resulta más suave, en cuanto a pendiente, que en el caso anterior (Figura 4.13), con una tendencia parecida al caso de modificación a pendientes positivas.

5. Estimación de la deformación de rotura ϵ_R

Por lo que se refiere al ajuste de la deformación longitudinal unitaria de rotura, la diferencia entre el valor de probeta ideal y de probeta recortada es muy significativa (Figura 4.4), por lo que se decide, a falta de mayor información, mantener los datos de partida (probeta ideal). Se introduce esta regla en la metodología

4.5. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Dagdug and L. S. García-Colín, “Generalization of the Williams–Landel–Ferry equation,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 250, no. 1–4, pp. 133–141, Feb. 1998.
- [2] P. Lomellini, “Williams-Landel-Ferry versus Arrhenius behaviour: polystyrene melt viscoelasticity revised,” *Polymer*, vol. 33, no. 23, pp. 4983–4989, 1992.
- [3] Y. F. Shutilin, “Use of the Williams-Landel-Ferry and Arrhenius equations in describing the relaxational properties of polymers and polymer homologues,” *Polymer Science U.S.S.R.*, vol. 33, no. 1, pp. 119–127, 1991.
- [4] A. S. Khan, O. Lopez-Pamies, and R. Kazmi, “Thermo-mechanical large deformation response and constitutive modeling of viscoelastic polymers over a wide range of strain rates and temperatures,” *International Journal of Plasticity*, vol. 22, no. 4, pp. 581–601, Apr. 2006.
- [5] G. J. Frank and R. A. Brockman, “A viscoelastic–viscoplastic constitutive model for glassy polymers,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 30–31, pp. 5149–5164, Jul. 2001.
- [6] A. D. Drozdov, “Modelling the nonlinear viscoelastic behavior of amorphous glassy polymers,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 30, no. 5–6, pp. 49–72, Sep. 1999.

CAPÍTULO 5

OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se inicia el caso práctico de aplicación de la metodología sobre la empresa *Faurecia Interior Systems* plataforma Abrera. Se presentan los materiales objeto de la estimación de los Factores de Escala Máster para las familias ABS y PPT. Se describe la selección de las piezas fuente de extracción de las muestras así como el procedimiento de obtención de éstas. Se exponen las curvas elastoplásticas obtenidas de cálculo para cada uno de los materiales aplicando la metodología. Finalmente se realiza una valoración sobre la respuesta hallada para los componentes envejecidos mediante exposición solar.

5.1. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO

Se pretende realizar el estudio con 4 materiales de distinta composición química, materiales representativos usuales para sistemas de interior de automoción. No se muestra el nombre de cada uno de ellos según criterios de confidencialidad.

Se seleccionan los siguientes elementos:

1. Polipropileno PP copolímero con un 16% de carga mineral de Talco (PPT16).

La matriz polimérica PP es muy atractiva por su bajo precio y tenacidad. Sin embargo, para un mejor comportamiento mecánico, suele acompañarse de carga mineral, aumentando su rigidez pero disminuyendo el grado de tenacidad. El talco también aporta una disminución del calor específico y un aumento de la conductividad térmica de la pieza. Se logra una reducción de los espesores de los componentes, mayor productividad y mejora de la estabilidad dimensional. La carga de talco es la más usada junto a la matriz polipropileno.

Este tipo de material representa un PP de capacidad mecánica baja, frecuentemente usado en muchas piezas de sistemas de interior, especialmente en aquellas que no se requiere un grado de funcionalidad elevado. En casos donde se requiere mayor calidad (vehículo de gama alta), se evita el uso de este material por criterios de durabilidad (desgaste) y estabilidad dimensional de pieza frente a ciclos de temperatura.

Se han seleccionado dos materiales PPT16 distintos. A lo largo del estudio se hará referencia a ellos como PPT16a y PPT16b.

2. Polipropileno PP copolímero con un 30% de carga mineral de Talco (PPT30). Material parecido al anterior pero con mejoras en el comportamiento frente a dinámica estructural.
3. ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), copolímero con mayor respuesta mecánica que los Polipropilenos. En sistemas de interior de gama baja y media suele usarse combinado con los dos anteriores, mientras que para acabados de alta calidad se recurre principalmente a ABS combinados con ABS-PC (con Policarbonatos) y materiales *composites*.

5.2. FORMA Y DIMENSIONADO DE LAS PROBETAS IDEALES

La normativa utilizada para el dimensionado de las muestras (probetas ideales y probetas recortadas) es la UNE-EN-ISO-527-2 [1]. Esta normativa define varias tipologías. En el presente proyecto se han usado, en concreto, la 1B y la 1BA. En la siguiente página pueden verse las cotas definidas para cada una de estas tipologías. Los valores l_3 y b_2 limitan el rectángulo mínimo necesario para el recorte, en el ejercicio de extracción de pieza inyectada.

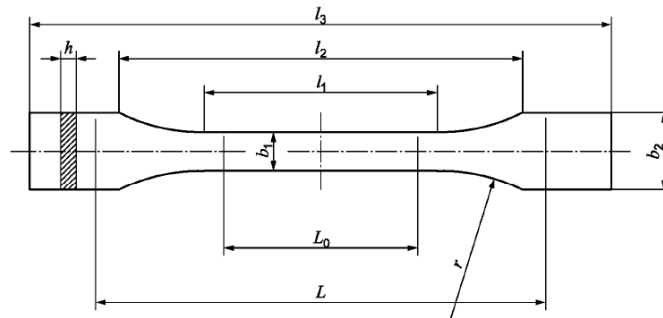


Tabla 1 – Medidas de las probetas tipo 1A y 1B

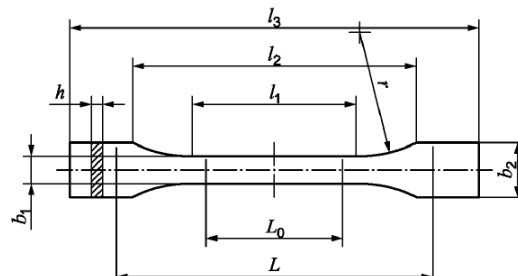
Medidas en milímetros

	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h	Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Longitud de referencia (recomendada) Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$75,0 \pm 0,5$ $50,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1

^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.

Figura 5.1. Dimensiones probetas a tracción tipos 1A y 1B. ISO 527-2:2012



Medidas en milímetros

	Tipo de probetas	1BA	1BB
l_3	Longitud total	≥ 75	≥ 30
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r	Radio	≥ 30	≥ 12
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Anchura en los extremos	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	Anchura de la parte estrecha	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h	Espesor	≥ 2	≥ 2
L_0	Longitud de referencia	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L	Distancia inicial entre las mordazas	$l_2 + \frac{+2}{0}$	$l_2 + \frac{+1}{0}$

NOTA Los tipos de probetas 1BA y 1BB son una reducción proporcional de las probetas tipo 1B con un factor de reducción del 1:2 y 1:5, respectivamente, con excepción del espesor.

Figura 5.2. Dimensiones probetas a tracción tipo 1BA y 1BB. ISO 527-2:2012

5.3. DATOS PROBETA IDEAL

Las curvas obtenidas mediante probeta ideal han sido suministradas por dos fabricantes multinacionales de materiales plásticos. Estos datos no siempre pueden obtenerse directamente del proveedor, por lo que debe tenerse en cuenta el hecho de que es posible recibir esta información en menor detalle.

5.3.1. CURVAS MATERIAL PPT16a, PROBETA IDEAL

Para este material se han fabricado probetas mediante inyección de placa, siguiendo el dimensionado ISO R527 tipo1B, con radio r de 60 mm y distancia entre mordazas L de 109 mm. Las probetas han sido recortadas en la dirección transversal al flujo de inyección.

Los ensayos se han llevado a cabo en una máquina universal Instron 4200. Se ha impuesto una velocidad de deformación de 50 mm/min constante (0,83 mm/seg).

Los resultados corresponden a valores medios de una muestra estadística de probetas representativa. Los parámetros mecánicos resumidos a 23°C se muestran en la siguiente tabla:

Material	Test Temperatura (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/seg)	Modulo Origen E (MPa)	Tensión Máxima (MPa)	Deform. máxima tensión (%)	Tensión Ruptura (MPa)	Deform. Ruptura (%)
PPT16a	23	<u>Transv.</u>	0.83	2450	24.1	2.3	19.8	9
		<u>Long.</u>	-	-	-	-	-	-

Tabla 5.1. Caracterización mecánica del PPT16a, 23°C

Los datos de ingeniería (convencional) se han modificado para obtener la curva verdadera, corrección válida a partir del límite de fluencia de cálculo.

Los puntos posteriores a la tensión máxima serán modificados mediante la corrección a pendientes positivas, o según modelo de endurecimiento *Endurec1* o *Endurec2*. La selección de esta corrección se realizará a partir de los resultados del ejercicio de validación test-simulación (Modelo Tapa Asidero) presentado en el próximo capítulo.

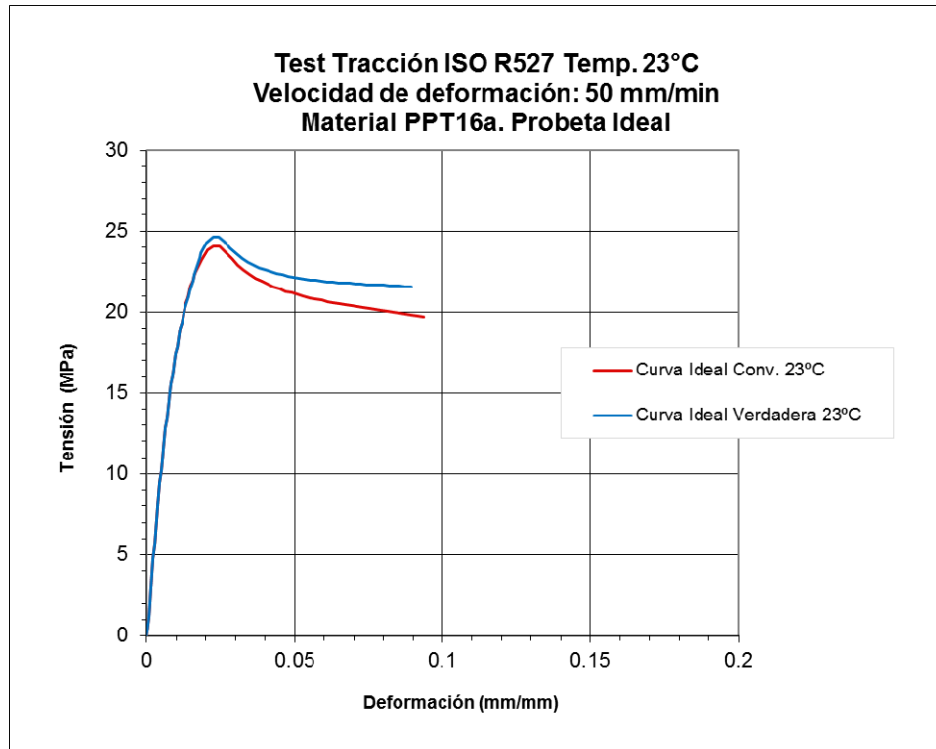


Figura 5.3. Curvas elastoplásticas material PPT16a, probeta ideal. Curva convencional y curva verdadera corregida

5.3.2. CURVAS MATERIAL PPT16b, PROBETA IDEAL

Se ha usado la misma tipología 1B, con radio r de 60 mm y distancia entre mordazas L de 109 mm. En este caso, las probetas se han obtenido para los dos tipos de flujo (longitudinal y transversal) por lo que se ha trazado la curva media (Tabla 5.2, Figura 5.4).

Se ha impuesto la misma velocidad de deformación de 50 mm/min constante (0,83 mm/seg) en la máquina universal Instron 4200.

Material	Test Temperatura (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/seg)	Modulo Origen E (MPa)	Tensión Máxima (MPa)	Deform. máxima tensión (%)	Tensión Ruptura (MPa)	Deform. Ruptura (%)
PPT16b	23	Media	0.83	1918	19.25	2	14.9	16.5

Tabla 5.2. Caracterización mecánica del PPT16b, 23°C

Se han calculado la curva media de ingeniería y su corrección a valores verdaderos. De igual forma, la ley de endurecimiento más allá de las tensiones máximas se aplicará en función de los resultados obtenidos en el próximo capítulo.

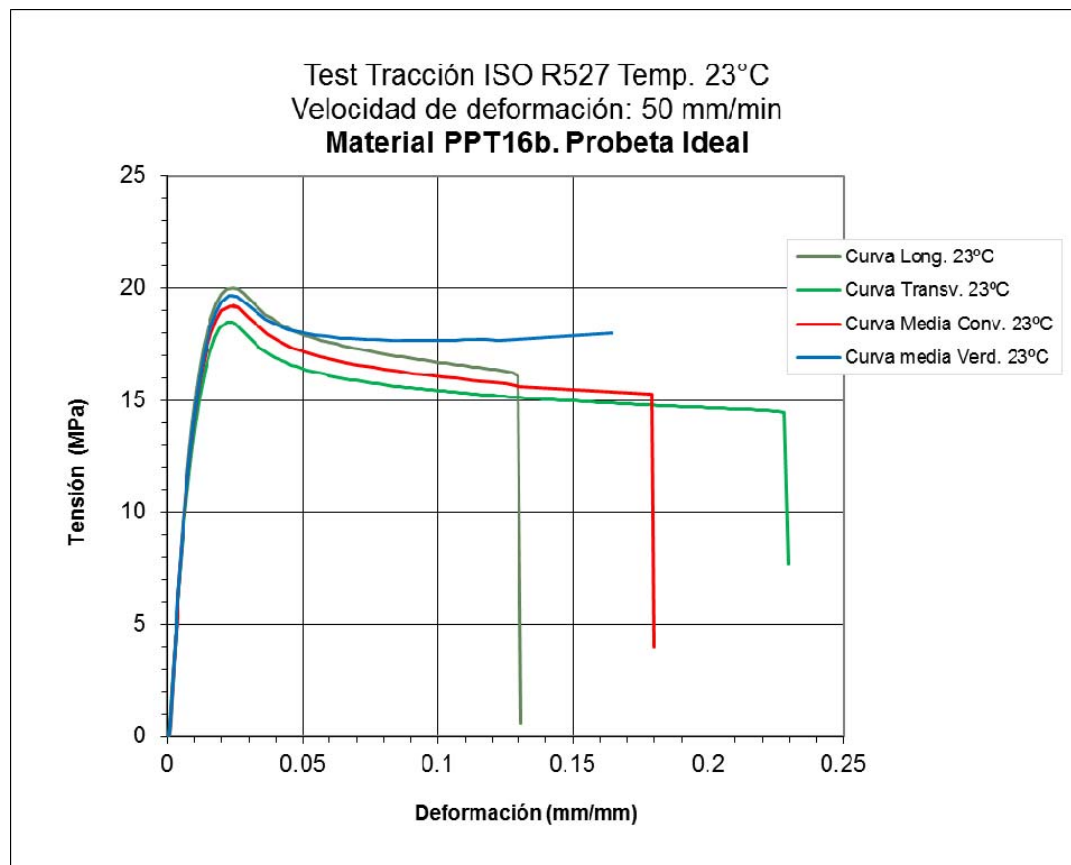


Figura 5.4. Curvas elastoplásticas material PPT16b, probeta ideal. Curva media convencional (rojo) y curva media verdadera (azul)

5.3.3. CURVAS MATERIAL PPT30, PROBETA IDEAL

De la misma forma que para el anterior material, se han obtenido probetas mediante inyección de placa, siguiendo el dimensionado ISO R527 tipo1B, con radio r de 60 mm y distancia entre mordazas L de 109 mm. Las probetas han sido recortadas en la dirección transversal al flujo de inyección. No se dispone de datos en dirección longitudinal. Velocidad de deformación en el ensayo: 50 mm/min constante.

Los ensayos se han llevado a cabo con la misma máquina universal Instron 4200.

Material	Test Temperatura (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/seg)	Modulo Origen E (MPa)	Tensión Máxima (MPa)	Deform. máxima tensión (%)	Tensión Ruptura (MPa)	Deform. Ruptura (%)
PPT30	23	Transv.	0,83	2800	21,2	2	17,4	11
		Long.	-	-	-	-	-	-

Tabla 5.3. Caracterización mecánica del PPT30, 23°C

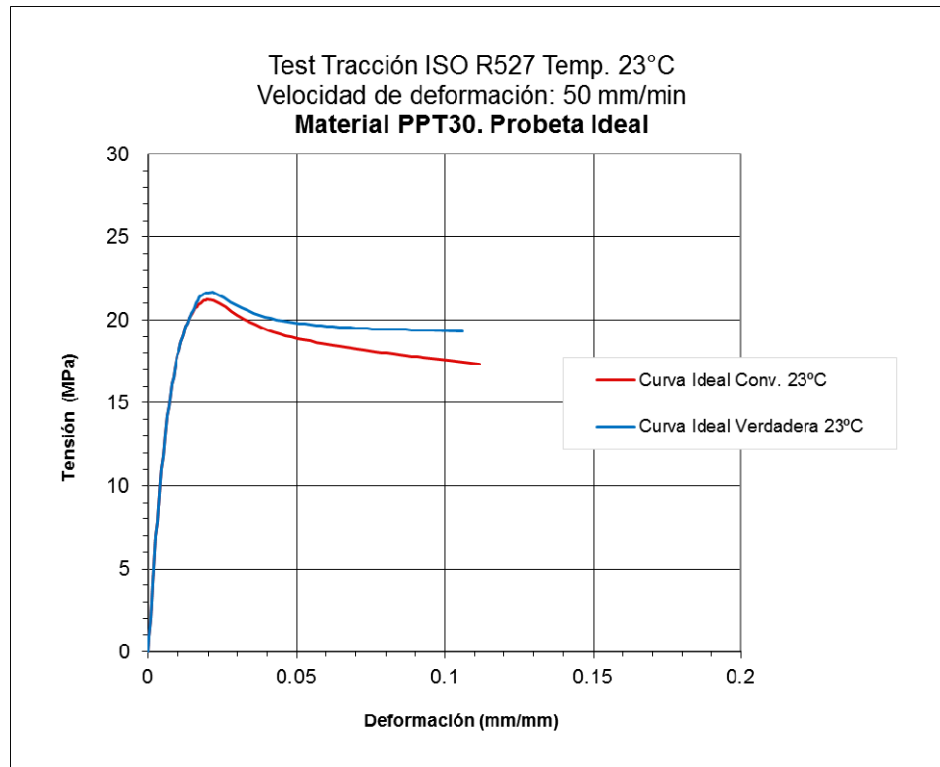


Figura 5.5. Curvas elastoplásticas material PPT30, probeta ideal. Curva convencional y curva verdadera corregida

5.3.4. CURVAS MATERIAL ABS, PROBETA IDEAL

De igual forma que para los materiales anteriormente presentados se obtienen muestras mediante inyección de placa, con idénticos parámetros. Las dimensiones de las muestras corresponden a la misma ISO R527 pero con tipología 1A, siendo el espesor de 4 mm. Los datos de los especímenes se presentan como valores medios, por lo que no se especifica la dirección del flujo respecto a la fabricación de éstas. Velocidad de deformación de ensayo: 5 mm/min constante. Los ensayos se han llevado a cabo con una máquina universal MTS 810.

Material	Test Temperatura (°C)	Dirección flujo	Velocidad (mm/seg)	Modulo Origen E (MPa)	Tensión Máxima (MPa)	Deform. máxima tensión (%)	Tensión Ruptura (MPa)	Deform. Ruptura (%)
ABS	23	Media	0,083	2400	45,7	3	36,3	3,9

Tabla 5.4. Caracterización mecánica del ABS, 23°C

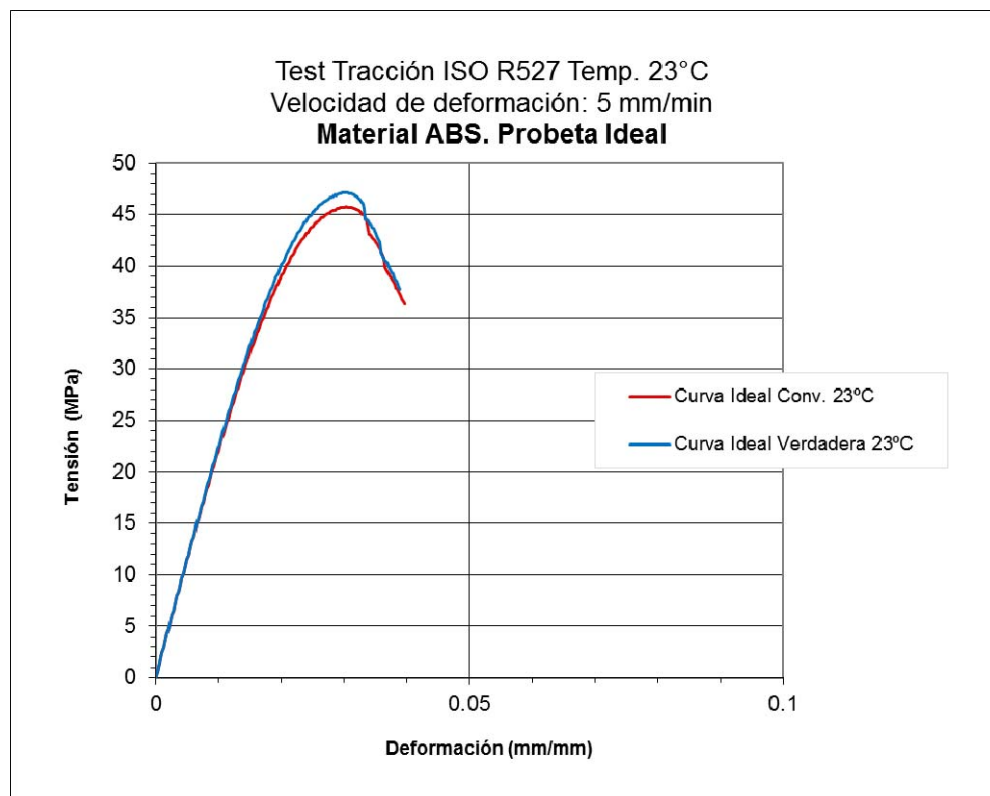


Figura 5.6. Curvas elastoplásticas material ABS. Curva convencional y curva verdadera corregida

5.4. DATOS PROBETA RECORTADA

5.4.1. COMPONENTES FUENTE PARA EXTRACCIÓN DE PROBETAS RECORTADAS

A continuación se describen los componentes seleccionados.

Se han obtenido muestras procedentes de 8 componentes elaborados con los 4 materiales objeto de investigación. En la Tabla 5.5 puede verse las características de cada uno de ellos. Estos componentes responden a distintos niveles de complejidad de diseño, distintos años de inyección en proceso de producción, y distintos materiales.

Adicionalmente se han obtenido muestras de 2 componentes sometidos a un entorno natural de radiación solar durante años (Tabla 5.6). En concreto, una pieza Cuerpo Consola y dos Piezas Estructurales han sido conservadas en la localidad de Abrera sobre

una base plana detrás de una ventana sin ningún tipo de barrera adicional que el mismo cristal. Para el componente Cuerpo Consola, el periodo de acondicionamiento ha sido de unos 2 años, desde octubre de 2002 hasta diciembre de 2004. En el caso de las Piezas Estructurales, el periodo ha llegado hasta los 10 años, de marzo del 2003 a abril del 2013.

Esta información se trata de forma excepcional, debido al tiempo de acondicionamiento de los componentes. Tan solo si se detecta un nivel de degradación importante se introducirá esta variable en la metodología.

Familia	Componente	Año inyección /test	Material
PPT	Cuerpo Consola	2004	PPT16a
	Inserto	2008	PPT16b
	Panel Delantero	2013	
	Panel Trasero	2013	
	Pieza Estructural	2004	PPT30

Familia	Componente	Año inyección / test	Material
ABS	Inserto	2008	ABS
	Inserto	2012	
	Armazón Asidero	2012	

Tabla 5.5. Componentes de estudio según familia de materiales

	Componente	Año inyección	Año test
PPT16a	Consola	2002	2004
PPT30	Pieza Estructural	2003	2013

Tabla 5.6. Componentes adicionales para el estudio de envejecimiento natural

5.4.1.1. Componente Cuerpo Consola central (CC). Material PPT16a

Este componente supone una piel de recubrimiento de un conjunto consola central; funcionalidad estética. De ahí su forma alargada de espesor constante, con pocas áreas con discontinuidades geométricas, nervios u otras protuberancias.

Presenta zonas limpias para la extracción de muestras suficientemente grandes por lo que cada pieza inyectada abastece de una buena cantidad de éstas.

La Figura 5.7 muestra el modelo CAD realizado sobre esta pieza para la posterior creación de los modelos CAE, para el análisis estructural y análisis reológico.

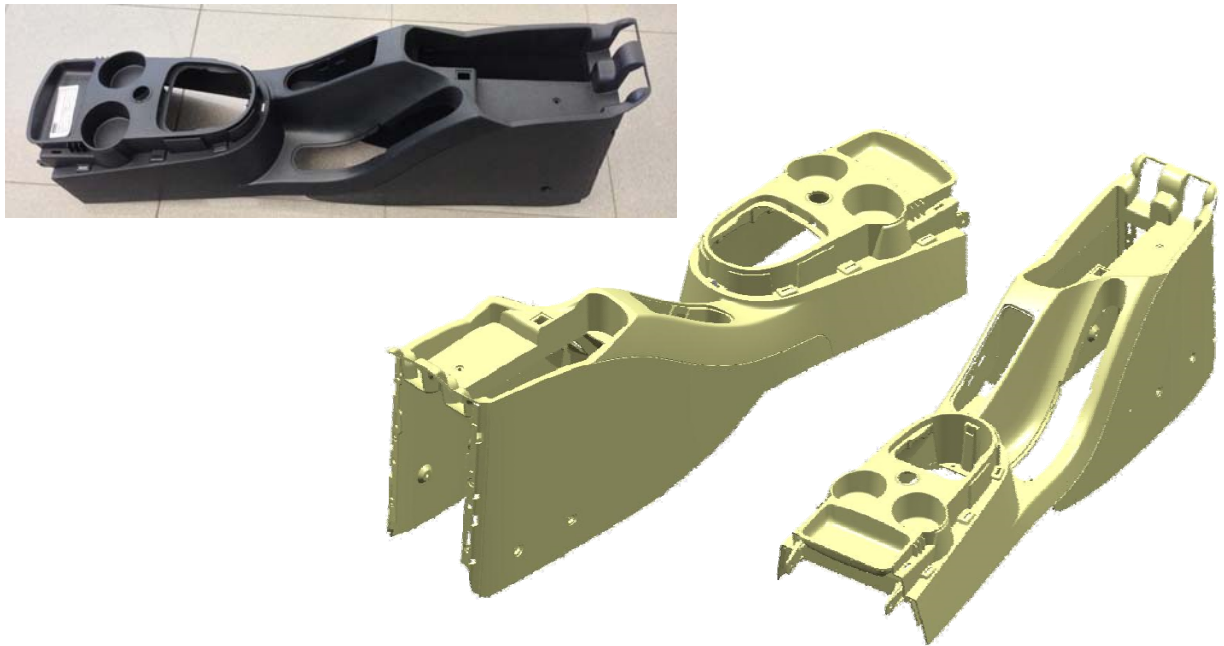


Figura 5.7. Pieza Cuerpo de una Consola central

5.4.1.2. Componente Pieza Inserto (INS). Material PPT316b y ABS

Pieza inserto medallón de un módulo puerta en zona apoyabrazos. Presenta funcionalidad de apoyabrazos en la parte posterior. Su diseño permite varias zonas de extracción de muestras, únicamente evitando los clipajes al cuerpo panel.



Figura 5.8. Pieza Inserto módulo panel puerta, inyección material PPT16b

Se ha realizado extracción de muestras de piezas fabricadas con PPT16b y también con material ABS.

5.4.1.3. Componente Pieza Estructural consola central (PE). Material PPT30

Pieza interna no vista de un conjunto Consola Central, con funcionalidad estructural. Su diseño da respuesta directa a los requerimientos mecánicos sobre todo el conjunto, pudiéndose visualizar una zona que acoge la bisagra para la tapa apoyabrazos, las paredes laterales para una mayor rigidez en estas dos áreas laterales y los puntos de sujeción al túnel metálico (en la base de la pieza). Pieza con pocas áreas netas de extracción de probetas.

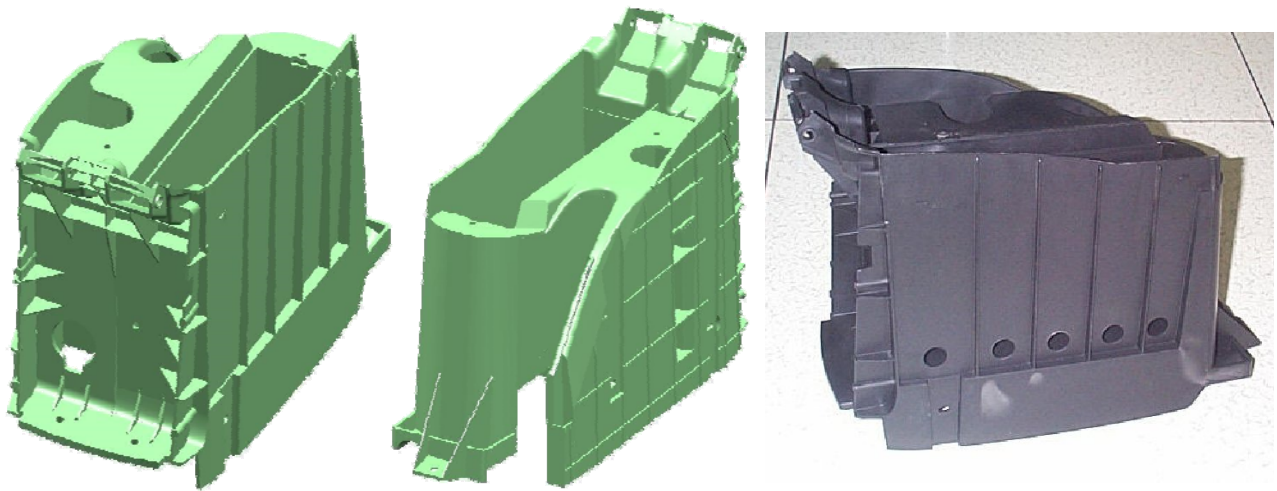


Figura 5.9. Pieza estructural interna de un conjunto de consola central

5.4.1.4. Panel Delantero (PD). Material PPT16b

Pieza revestimiento interior de un conjunto módulo puerta, parte anterior, con anclaje de varias piezas, por lo que se le atribuye cierta funcionalidad estructural. Dispone de zonas netas para la extracción de muestras.



Figura 5.10. Panel Delantero de un conjunto módulo puerta de un automóvil

5.4.1.5. Panel Trasero (PT). Material PPT16b

Pieza revestimiento interior de un conjunto módulo puerta, parte posterior, parecida a la pieza delantera pero con menos zona libre de extracción. No obstante, admite el recorte de 5 zonas perfectamente netas.

Comportamiento reológico de inyección distinto al del panel delantero.



Figura 5.11. Panel Trasero de un conjunto módulo puerta

5.4.1.6. Armazón Asidero (AA). Material ABS



Figura 5.12. Armazón asidero de un conjunto módulo puerta

Pieza estructural del asidero de un módulo de puerta, con fuerte funcionalidad. Soporta los esfuerzos debidos al tiraje y a las acciones de apoyo de los brazos.

Presenta tan solo una pequeña ara neta para la extracción de material sobre los anclajes de línea inferior.

5.4.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE EXTRACCIÓN. TRAZABILIDAD

Se ha ubicado la posición de las muestras de extracción teniendo en cuenta la dirección del flujo del material durante su proceso de inyectado y de la disponibilidad de áreas de mayor planitud, de espesor uniforme y libres de marcas debidas a correderas o expulsores de molde.

Para el estudio de la calidad de las muestras de extracción se dispone de mapas obtenidos mediante simulación reológica, a partir el código numérico comercial *Moldflow*. En las siguientes figuras se muestran algunos de los gráficos resultantes para los distintos componentes; direcciones de flujo en cada zona, distribución de presiones y ubicación de las líneas de unión, una vez fijadas las variables de inyección.

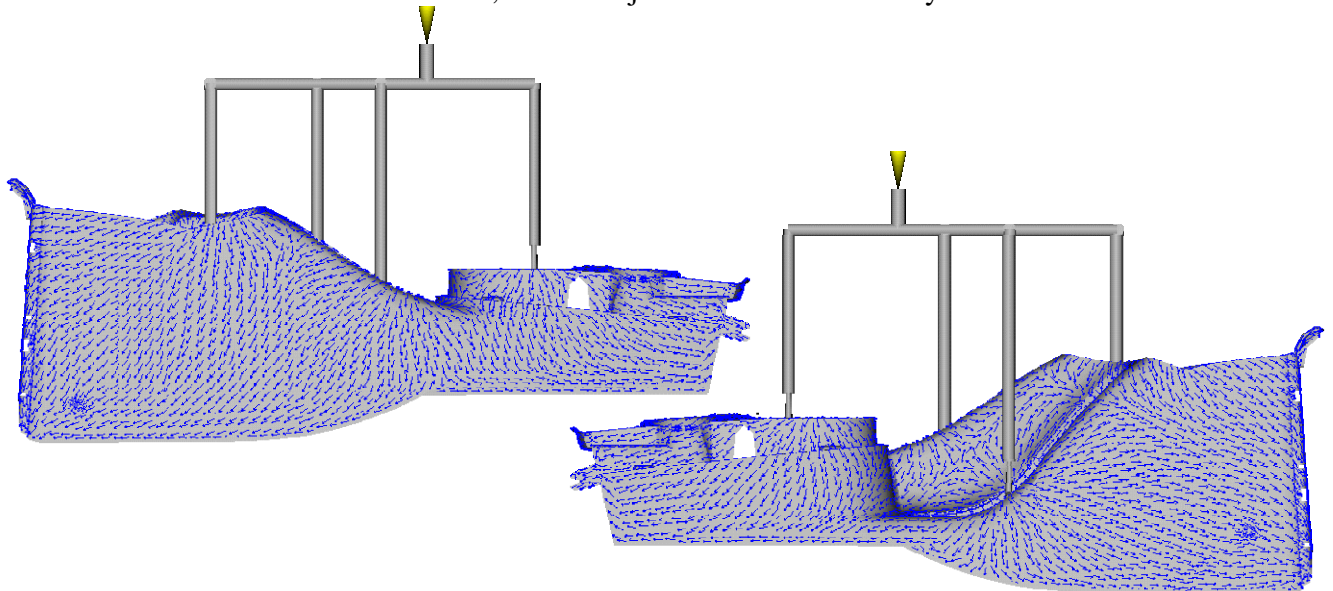


Figura 5.13. Orientación del flujo en inyección, pieza Cuerpo Consola central [2]

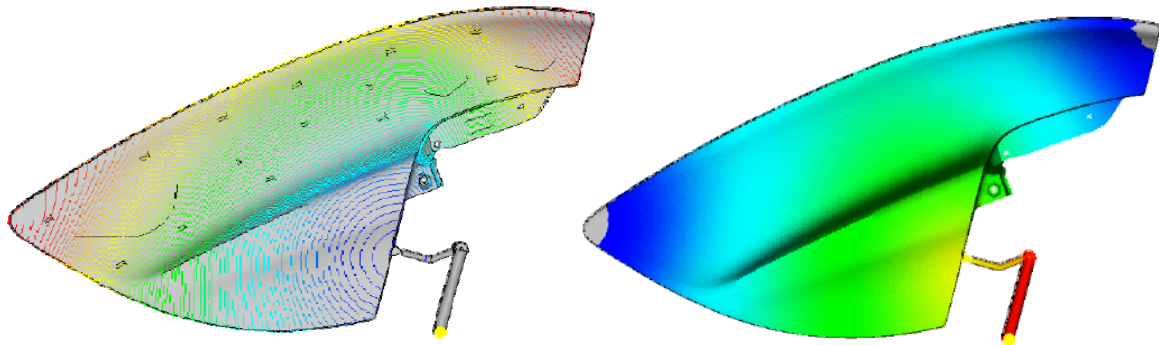


Figura 5.14. Esquema de tiempos de llenado (líneas) y distribución de presiones. Inserto [3]

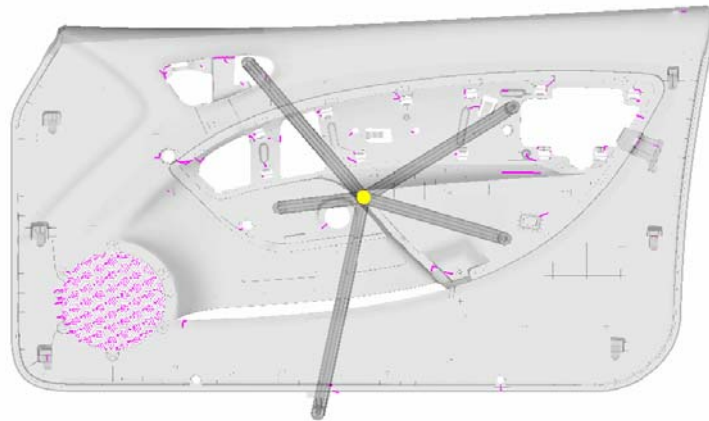


Figura 5.15. Líneas de unión (líneas de tigre), pieza Panel Delantero [4]

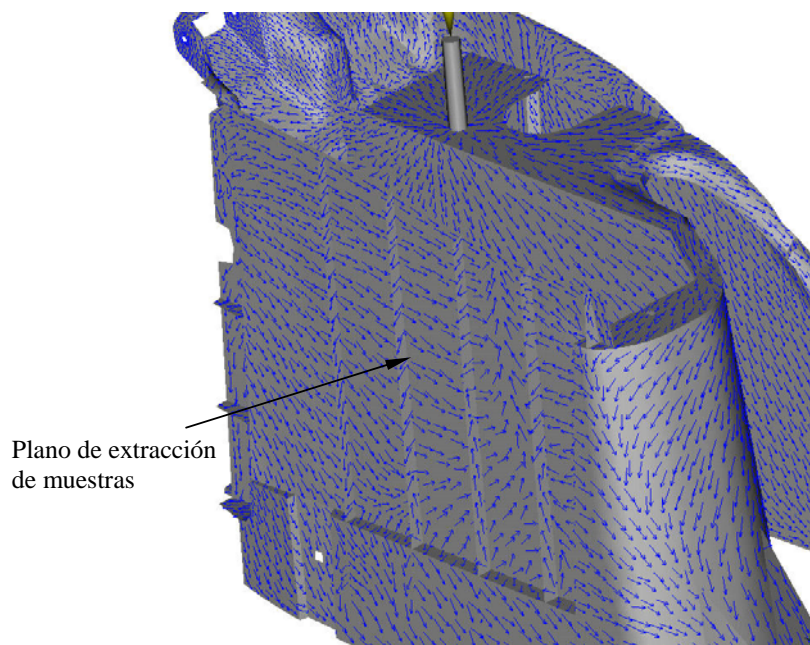


Figura 5.16. Líneas de flujo, detalle zona de extracción de muestras. Pieza Estructural [5]

Se han registrado las condiciones de inyección de cada componente. Se dispone de los informes de ensayo de molde para una posible trazabilidad de la influencia de estos parámetros sobre los resultados en la caracterización.

El Anexo B recoge uno de los documentos resumen del registro de los parámetros más relevantes para la inyección del componente Cuerpo utilizados para este estudio. Se muestra tan solo un informe y ciertos datos han sido omitidos por criterios de confidencialidad (de la misma forma que no se muestran las leyendas en las imágenes anteriores).

Se ha diseñado un código de identificación para las probetas, garantizando así su trazabilidad posicional sobre pieza. Se ha extendido alguna de las variables a valores no contemplados en esta tesis, por ejemplo: para ensayos a flexión F e impacto flexión IF, para potenciales estudios en un futuro. Estas tablas irán modificándose a medida que se disponga de información de más componentes: metodología con carácter vivo. En el Anexo C puede verse el detalle de la codificación (algún valor se ha omitido según criterios de confidencialidad).

Un ejemplo de codificación es el siguiente:

01 2004/ B ---T23V1e3A.CC

que corresponde a una muestra obtenida de una pieza Consola Central (CC) de primera inyección (01) del año 2004, material --- de la firma LyondellBasell, para ensayo a tracción a 23°C (T23), con una velocidad sostenida de valor constante entre 1 y 5 mm/min (V1), de espesor nominal de 3 mm (e3) y extraída en zona A.

Se parte de 5 probetas para la caracterización de cada componente, según establecen las normativas. Sin embargo, resulta óptima esta cantidad de muestras por dirección de estudio (flujo) en el caso de anisotropía, como regla general. En este caso, aunque no se trate de materiales compuestos, se ha seleccionado un total de 2 probetas por área para cada componente, cuando ha sido posible. Se ha utilizado más de una pieza en casos de escasez de superficie en zonas de extracción. Se realiza la media de las dos curvas obtenidas por zona. De esta forma, 10 probetas caracterizan cada componente, con la excepción del Armazón Asidero, donde solo se ha definido una sola área: 5 muestras totales a partir de 5 piezas.

5.4.3. DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS DE EXTRACCIÓN

Las dimensiones de las probetas extraídas vienen condicionadas por el tamaño del componente. Así, para el componente Cuerpo Consola, Inserto, Panel Delantero y Panel Trasero, se utilizan dimensiones de probetas de tipo 1B, y para la Pieza Estructural y el Armazón Asidero las dimensiones de las muestras son de tipo 1BA. La forma de estas tipologías se ha presentado anteriormente para los datos obtenidos mediante muestras ideales (Figura 5.1 y 5.2).

5.4.4. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

Tal y como se ha comentado anteriormente, las zonas de obtención de las probetas quedan determinadas por los valores reológicos conseguidos mediante las simulaciones de llenado, y espacio limpio suficiente.

Debe comentarse que para la obtención de una probeta es necesario recortar una placa de forma rectangular (plancha) con suficiente excedente para no afectar a la muestra mediante el primer proceso de corte bruto, y facilitar la conformación final.

Mediante métodos clásicos de corte se han obtenido las muestras (planchas rectangulares y conformación final de la muestra), para posteriormente implementar la codificación expuesta en el anterior apartado.

En el caso de detección de rebabas, éstas se han pulido teniendo especial cuidado de no afectar al dimensionado final.

Se ha procedido a la señalización mediante marcas de la longitud de referencia l_0 necesarias para el extensómetro en el ensayo [1].

Para las probetas del tipo 1B el marcado debe realizarse de la siguiente forma:

- Marcado del centro de la probeta. A partir este punto, realizar dos marcas a 25mm por cada uno de sus lados (izquierdo y derecho). La distancia entre marcas resulta $l_0=50\text{mm}$.

Para las probetas del tipo 1BA el marcado debe realizarse según:

- Marcado del centro de la probeta. Desde este punto, realizar dos marcas a 12.5 mm por cada uno de sus lados (izquierdo y derecho). La distancia entre marcas es de 25mm.

Se ha realizado una verificación dimensional en cada muestra. Las probetas destinadas a este tipo de ensayo tienen que ser verificadas mediante la comprobación de las dimensiones de la anchura b_l , del espesor h y de longitudes l_x .

Antes de proceder a la realización de los ensayos se ha garantizado el acondicionamiento según norma para materiales plásticos [6]:

- Atmósfera normalizada para acondicionamiento y ensayo de 88hrs a $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa del $50\% \pm 10\%\text{C}$.

Se ha realizado doble codificación en cada probeta con el objetivo de identificar las dos partes de éstas una vez finalizado cada ensayo.

5.4.4.1. Mapa de ubicación de las muestras componente Cuerpo Consola

A continuación se esquematiza la ubicación de muestras extraídas.

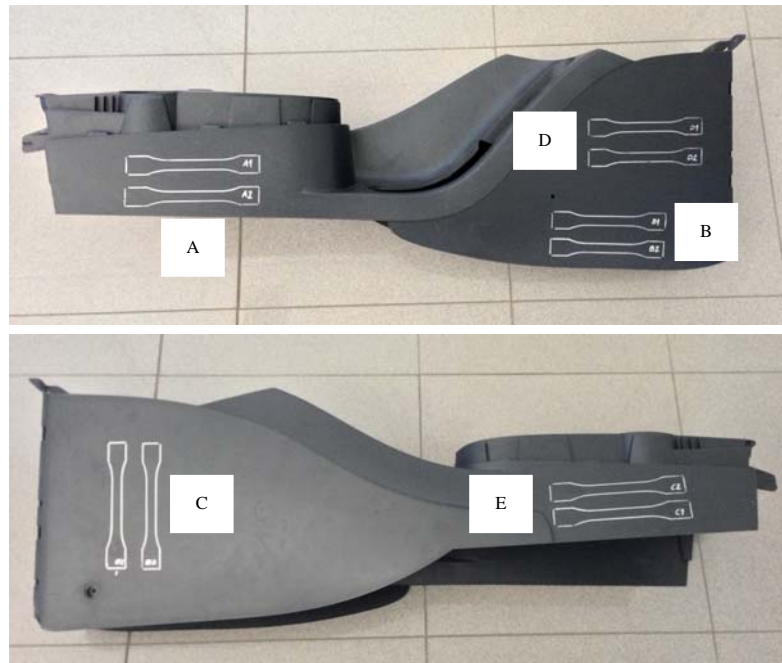


Figura 5.17. Áreas de extracción de planchas para ensayo, pieza Cuerpo Consola central

5.4.4.2. Mapa de ubicación de las muestras componente Inserto

Tanto para el PPT16b como para el ABS se ha utilizado la misma localización de muestras.

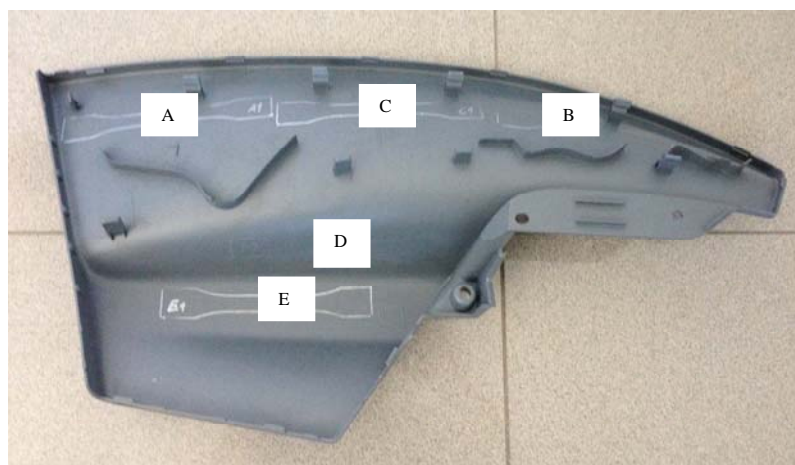


Figura 5.18. Áreas de extracción de planchas para ensayo. Inserto

5.4.4.3. Mapa de ubicación de las muestras componente Pieza estructural



Figura 5.19. Mapa de ubicación de las muestras componente Pieza Estructural

Cada zona solo admite una muestra. Se han utilizado 2 piezas para obtención total de todos los especímenes.

5.4.4.4. Mapa de ubicación de las muestras componente Panel Delantero

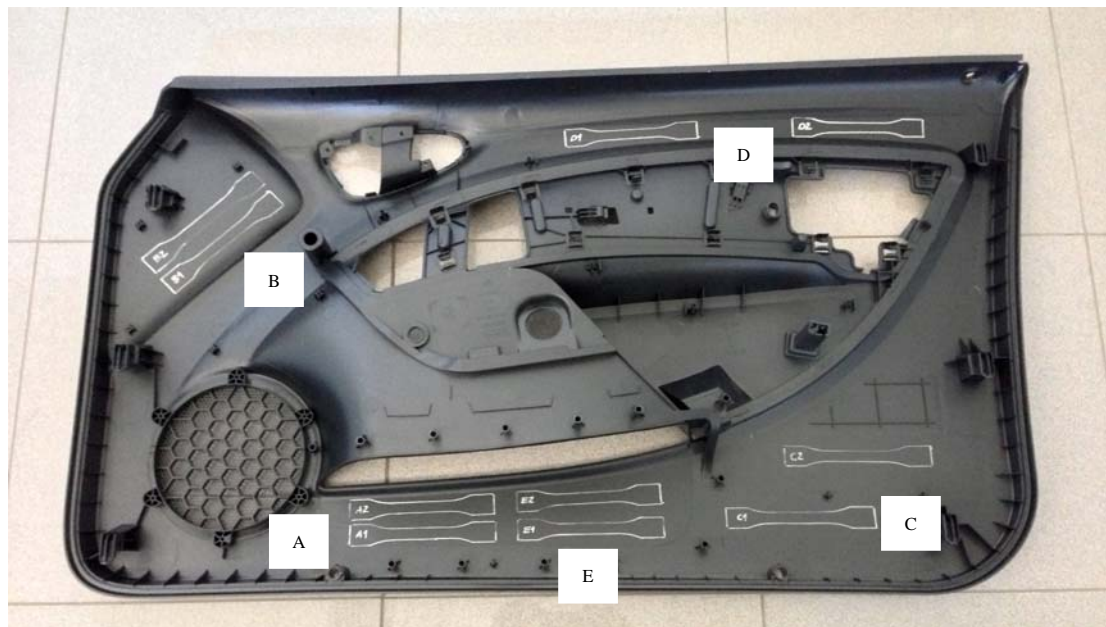


Figura 5.20. Mapa de extracción de las muestras, componente Panel Delantero

5.4.4.5. Mapa de ubicación de las muestras componente Panel Trasero

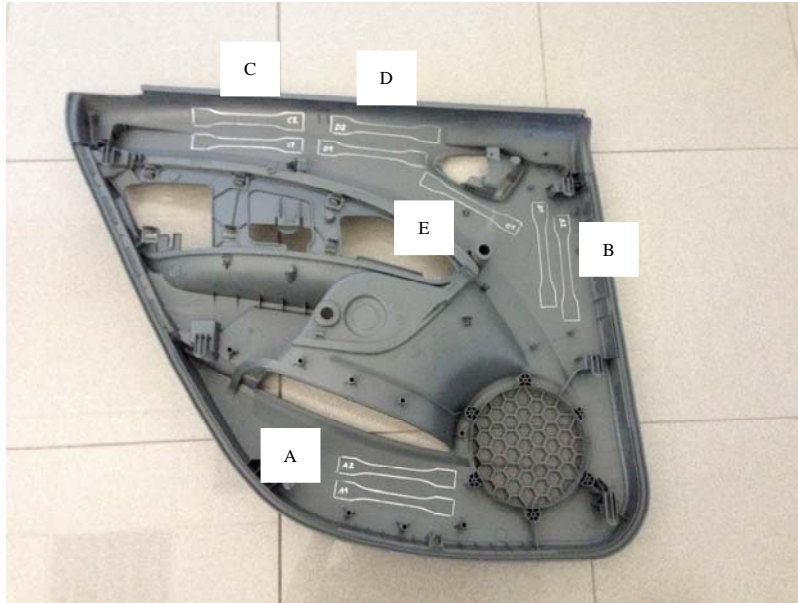


Figura 5.21. Zonas de extracción de planchas para ensayo. Panel Trasero

Para este panel, se ha utilizado una segunda pieza para lograr la pareja de muestras en la zona E.

5.4.4.6. Mapa de ubicación de las muestras componente Armazón Asidero



Figura 5.22. Zona A marcada para el recorte, componente Armazón Asidero

Pieza con muy poco espacio para recorte, lográndose tan solo una muestra por pieza.

5.4.5. CURVAS PROBETA RECORTADA DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO

5.4.5.1. Parámetros del ensayo material recortado PPT16a

5.4.5.1.1. Componente Consola Central inyección 2004 (CC 2004)

Se han recortado 10 muestras, 2 por zona, para obtener una sola curva representativa media por área y posteriormente obtener la curva media global. Tal como se ha comentado con anterioridad, se ha usado la tipología 1B, con radio de 60 mm. La distancia entre mordazas en el ensayo ha sido de 110 mm.

Los ensayos se han llevado a cabo en una máquina universal MTS Alliance RF100. Se ha impuesto una velocidad de deformación de 1 mm/min constante. Los resultados medios por zona se muestran en la figura 5.23.

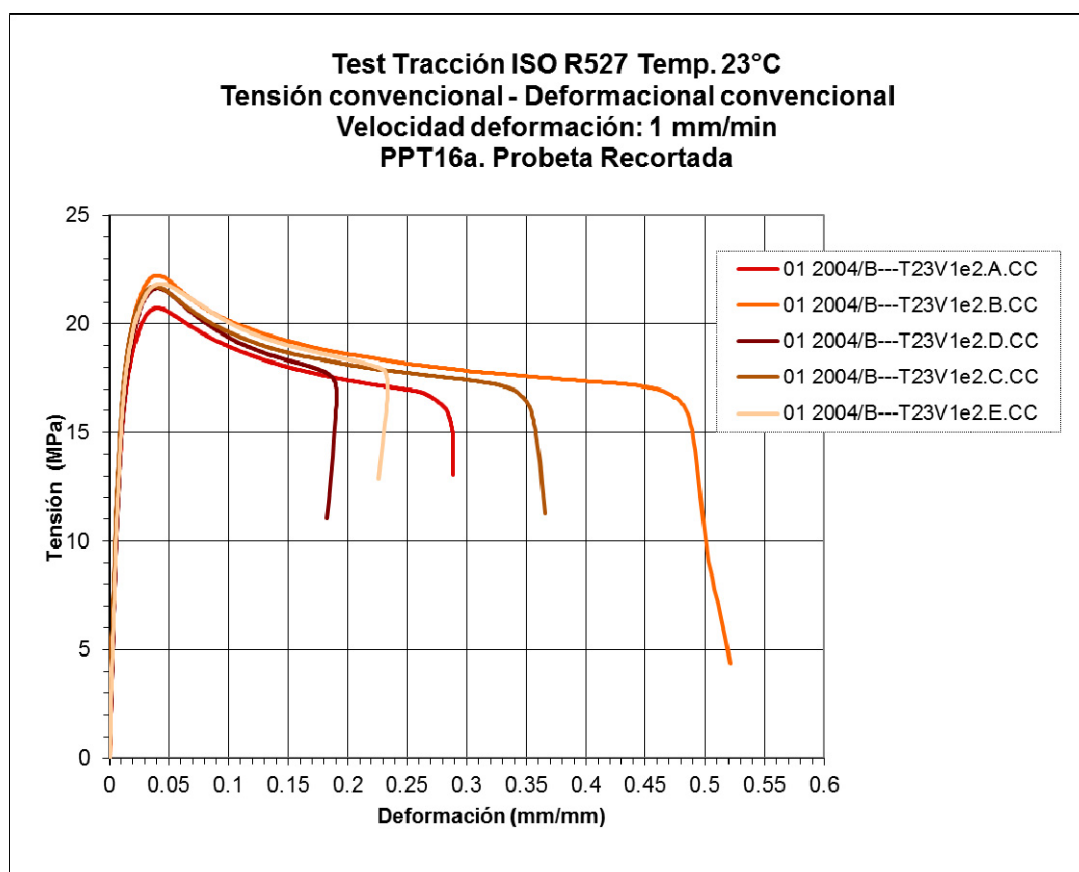


Figura 5.23. Curvas material recortado PPT16a CC 2004. Curva media 5 zonas

Las curvas reflejan la dispersión de los resultados, especialmente por lo que se refiere a la deformación longitudinal de rotura. La curva media representativa queda graficada en

la Figura 5.24. Esta curva media será utilizada para, mediante comparación con la ideal, establecer el factor de escala de este componente. Para tal fin se comparará el valor de la tensión máxima obtenida en ambas curvas.

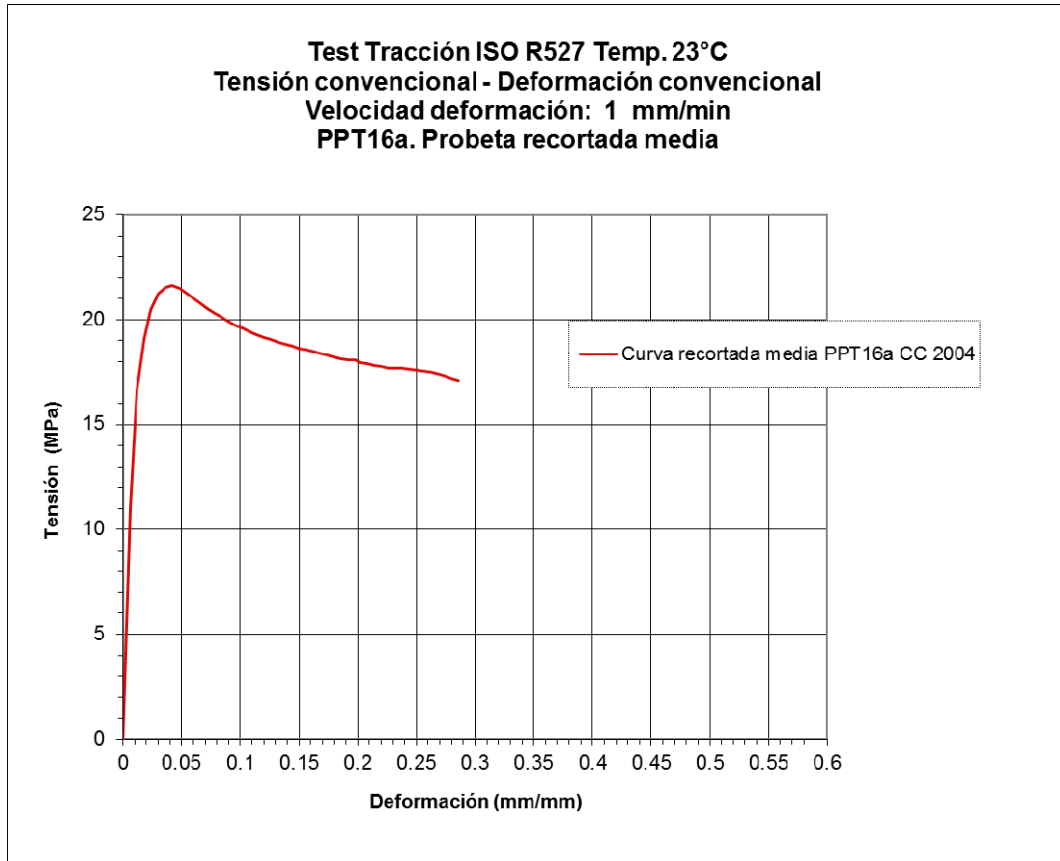


Figura 5.24. Curvas material recortado PPT16a CC 2004. Curva media componente

5.4.5.1.2. Componente Consola Central inyección 2002 / test 2004 (CC 2002-04)

Mediante el mismo procedimiento se han obtenido las muestras extraídas de la pieza CC inyectada en 2002 y sometida a radiación solar durante dos años.

Se ha usado una MTS Insight 100KN con célula de carga de 10KN, y las mismas variables de ensayo. La preparación de probetas y la realización de los ensayos se llevaron a cabo en 2004 (Figuras 5.25 y 5.26).

La curva media obtenida posibilita la comparativa con la curva recortada sin el proceso de envejecimiento. De esta forma es posible establecer la influencia de la radiación solar sobre la tensión máxima obtenida.

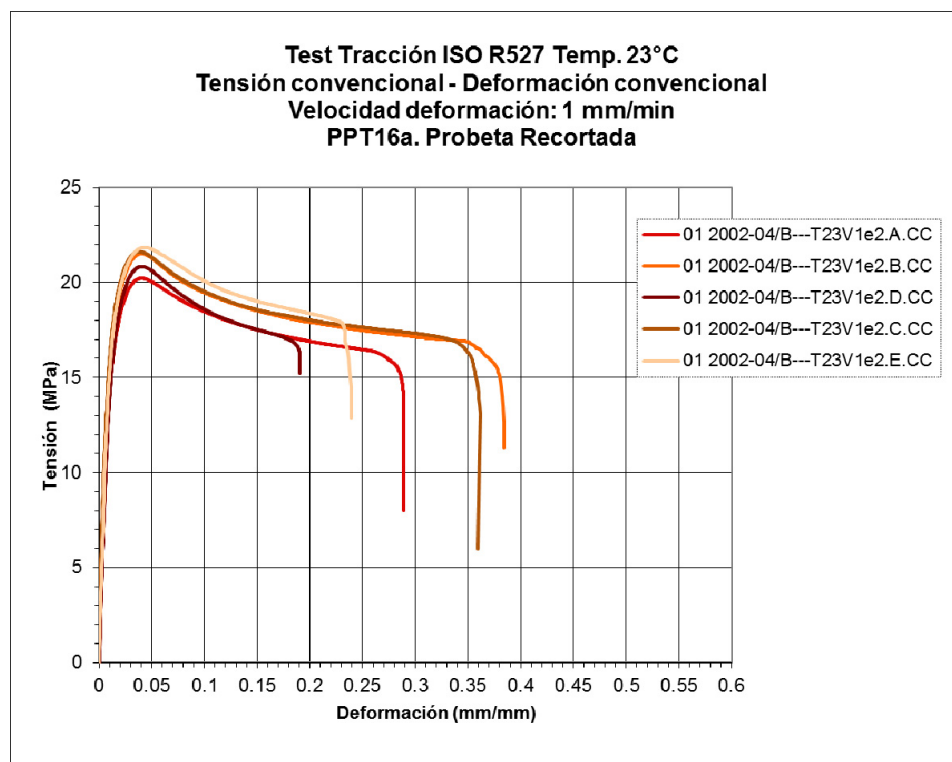


Figura 5.25. Curvas probeta recortada PPT16a CC 2002-04. Curvas medias 5 zonas

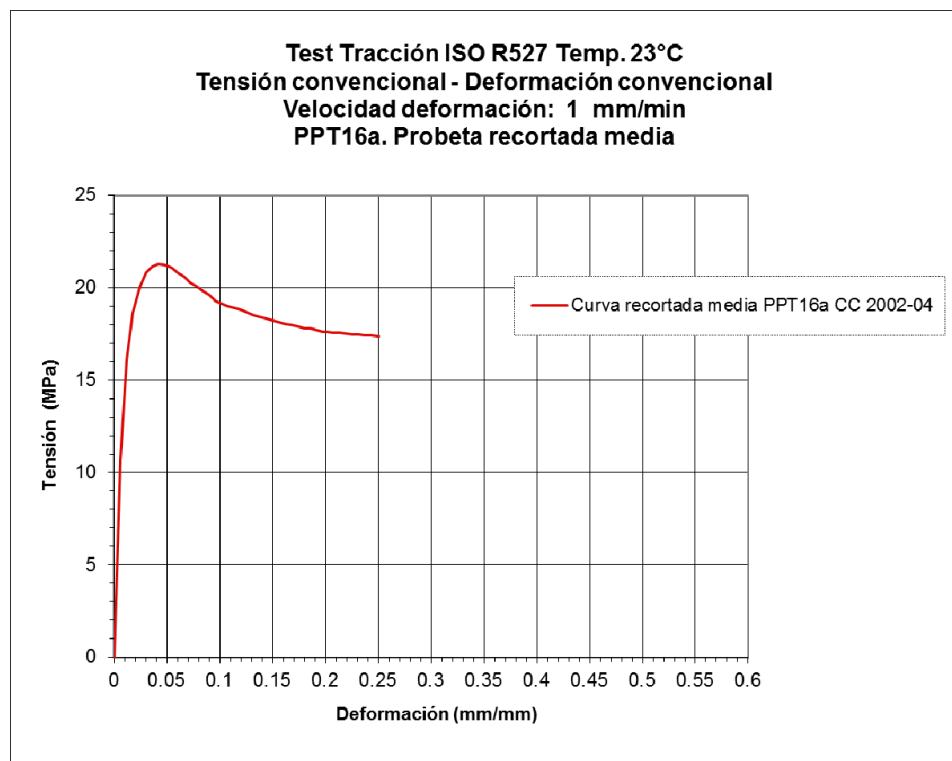


Figura 5.26. Curva media material recortado PPT16a CC 2002-04

5.4.5.2. Parámetros del ensayo material recortado PPT16b

5.4.5.2.1. Componente Inserto inyección 2008 (INS 2008)

En este caso se obtienen 5 especímenes por cada una de las dos piezas. Se ha usado la misma tipología 1B, con el mismo radio de 60 mm y distancia entre mordazas de 115 mm.

Los ensayos se han realizado en una máquina Instron 3365, con una velocidad de deformación de 5 mm/min (Figura 5.27).

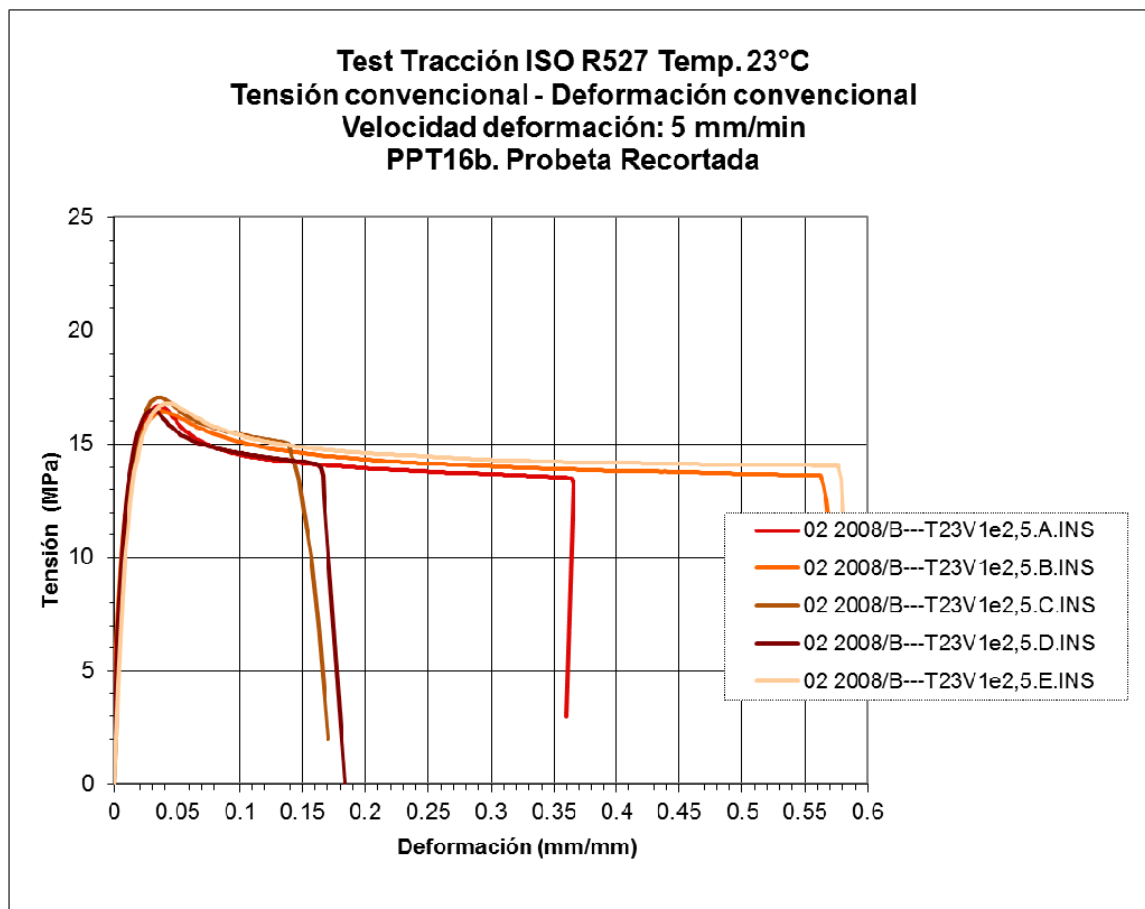


Figura 5.27. Curvas material recortado PPT16b INS 2008. Curvas medias 5 zonas

Las curvas obtenidas muestran también un cierto grado de dispersión en la etapa plástica.

La curva media se recoge en la siguiente imagen, para poder establecer el factor de escala.

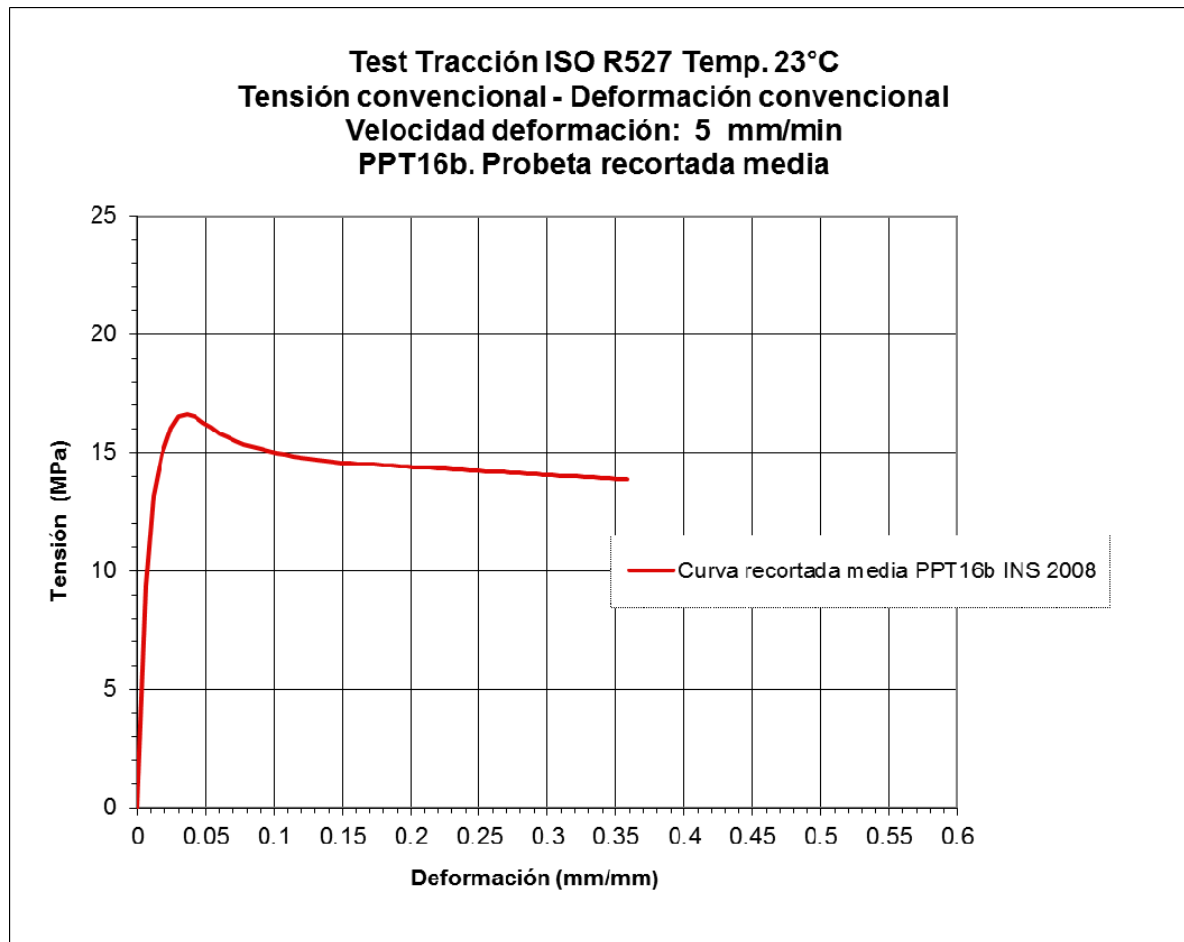


Figura 5.28. Curva media material recortado PPT16b INS 2008

5.4.5.2.2. Componente Panel Delantero PD inyección 2013 (PD 2013)

Se han recortado las 10 muestras de una misma pieza, componente Panel Delantero.

Se ha utilizado la misma tipología 1B (mismo radio de 60 mm y distancia entre mordazas $L=115$ mm). Los ensayos se han efectuado en la Instron 3365, con velocidad de deformación de 5 mm/min (Figuras 5.29 y 5.30).

La forma de la curvas es parecida a la obtenida para este material con el componente Inserto, pero con una tendencia de caída más suave en la zona de máxima tensión, una vez se ha superado este límite máximo. El valor de la tensión máxima es inferior a la hallada el caso anterior.

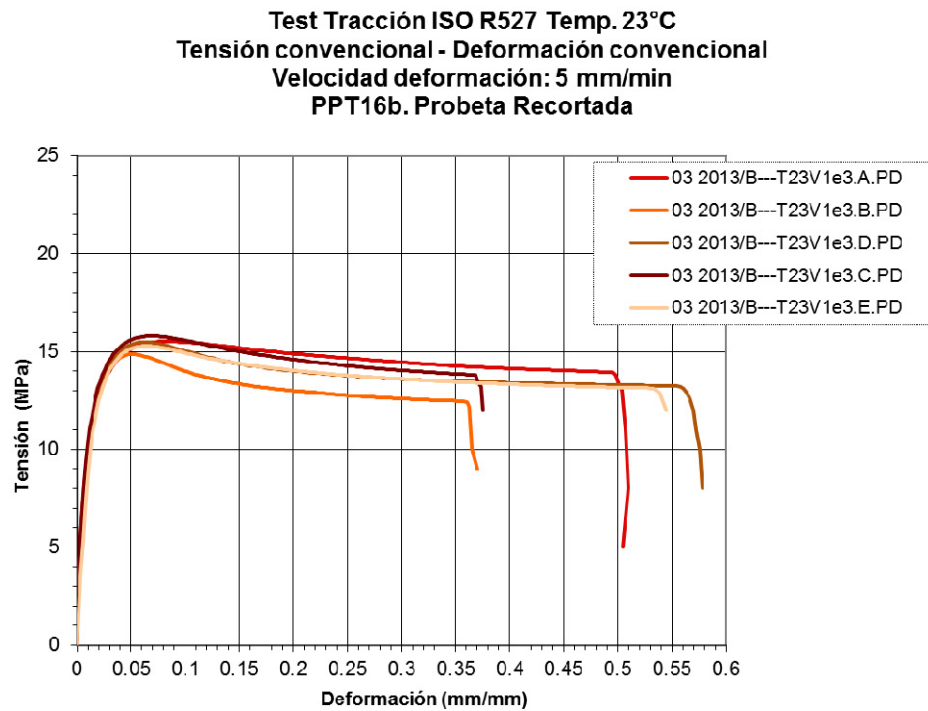


Figura 5.29. Curvas material recortado PPT16b PD 2013. Curvas medias 5 zonas

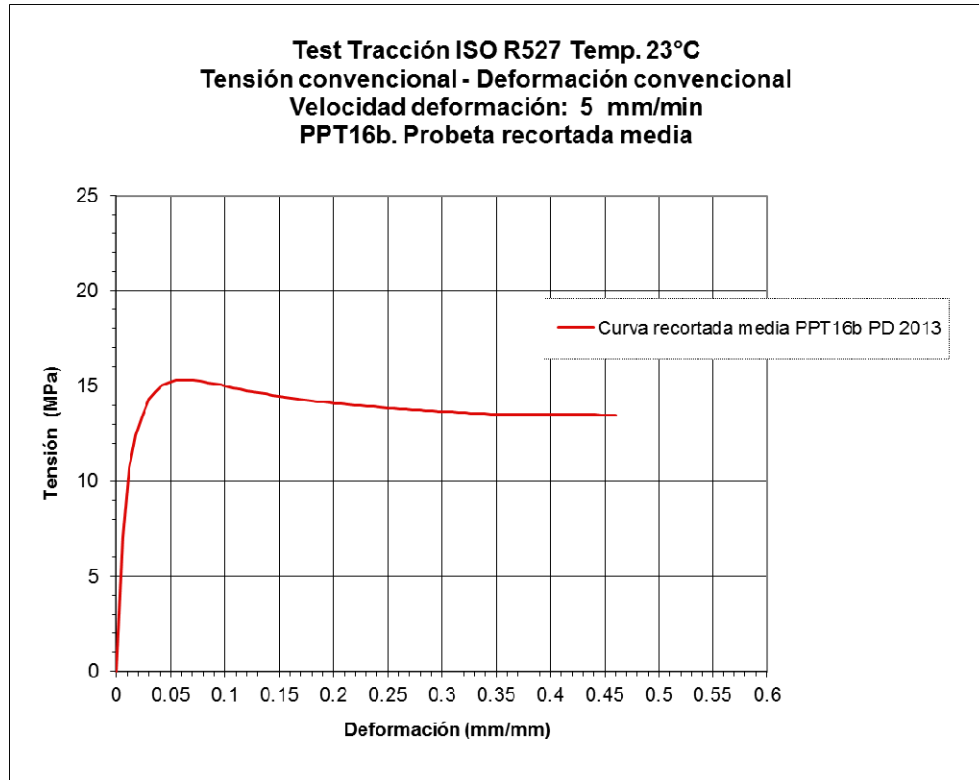


Figura 5.30. Curva media material recortado PPT16b PD 2013

5.4.5.2.3. Componente Panel Trasero PT inyección 2013 (PT 2013)

En este caso, para el mismo material pero del componente Panel Trasero, se han recortado 10 muestras, 9 en una primera pieza, obteniéndose la segunda muestra E2 mediante una segunda pieza.

Se ha usado la misma tipología 1B (mismo radio de 60 mm y $L=115$ mm). Los ensayos se han realizado en la misma Instron 3365. Se ha impuesto una velocidad de deformación de 5 mm/min (Figuras 5.31 y 5.32).

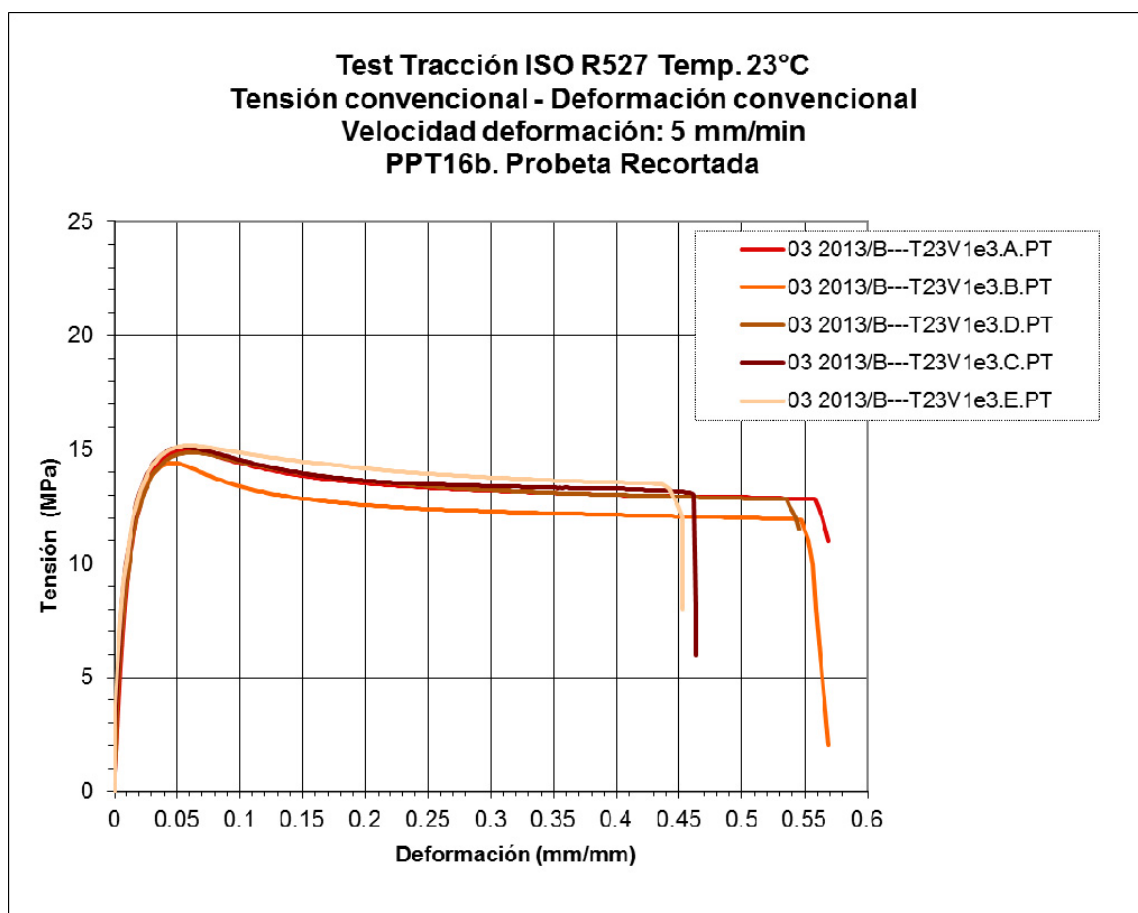


Figura 5.31. Curvas material recortado PPT16b PT 2013. Curvas medias 5 zonas

El trazo de las curvas es parecido al caso anterior. Esto se debe a que este componente, aun siendo de menor tamaño que el anterior, tiene un proceso de inyección similar.

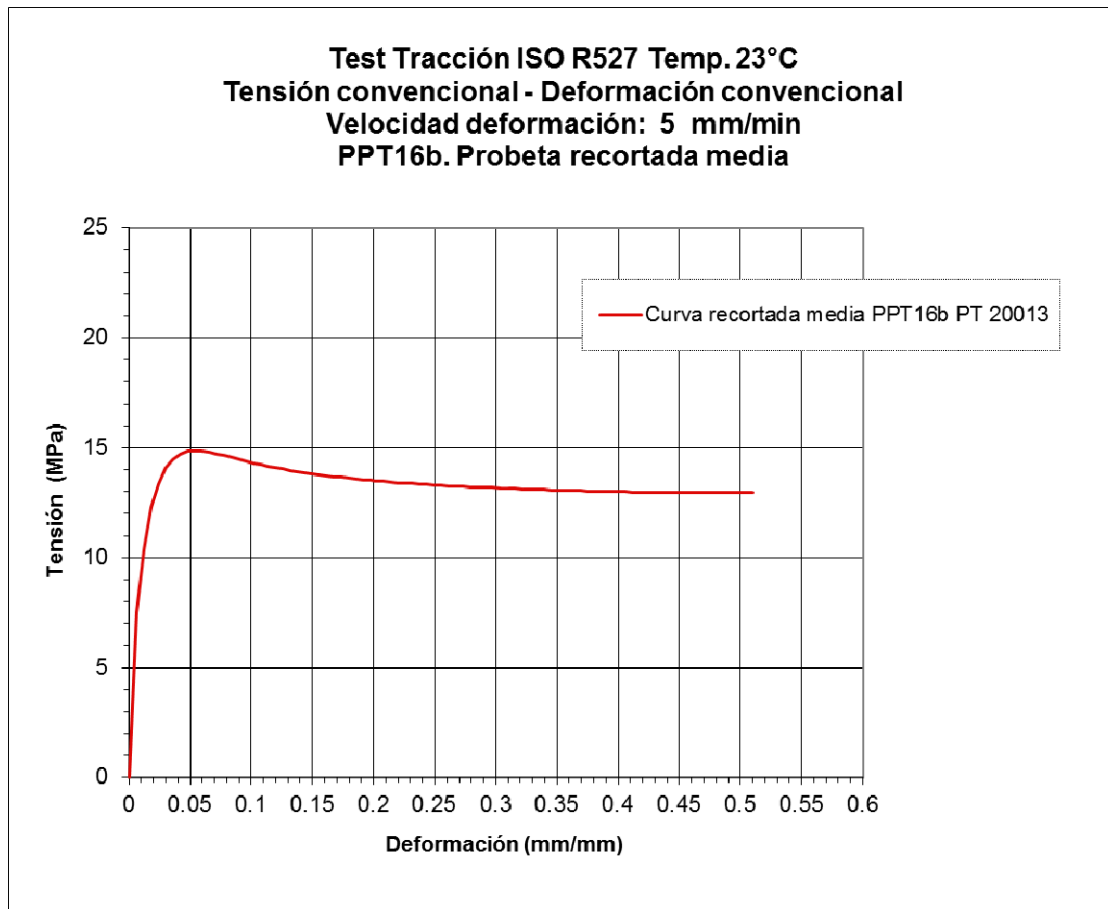


Figura 5.32. Curva material recortado PPT16b PT 2013. Trazo medio

5.4.5.3. Parámetros del ensayo material recortado PPT30

5.4.5.3.1. Componente Pieza Estructural PE inyección 2004 (PE 2004)

De igual forma se han sustraído probetas de dos piezas del componente Pieza Estructural.

Misma tipología 1BA, con radio de 60 mm y $L = 60$ mm. Los ensayos se han materializado en la MTS Alliance. Velocidad de deformación de 1 mm/min.

En este caso, el trazo vuelve a presentar una caída más pronunciada más allá de la tensión máxima (Figura 5.33). La curva media puede verse en la Figura 5.34.

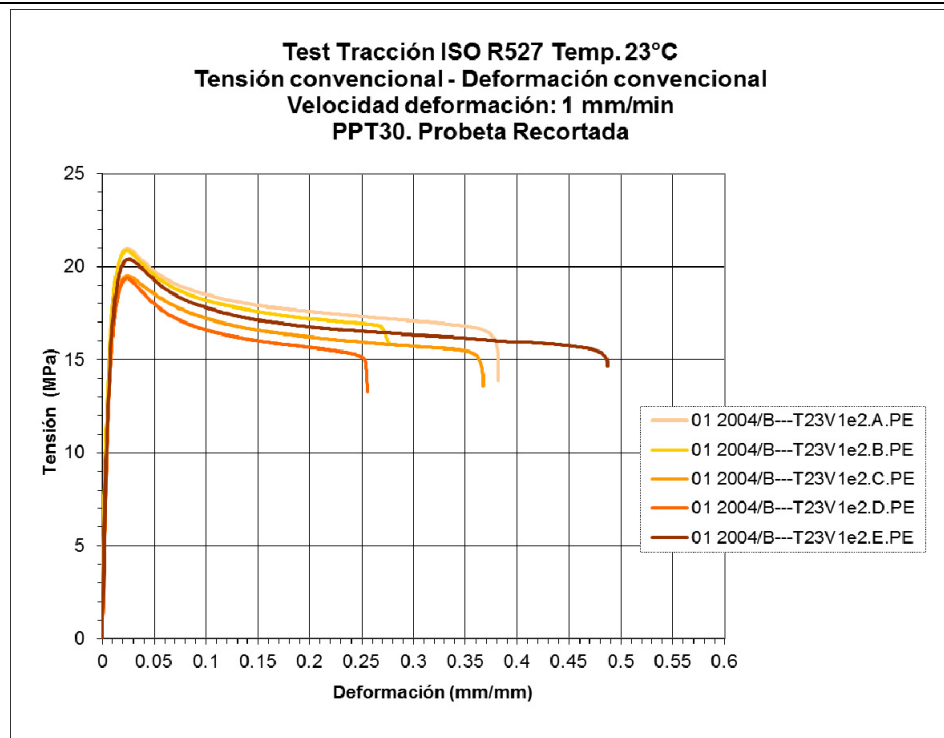


Figura 5.33. Curvas material recortado PPT30 PE 2004. Curvas medias 5 zonas

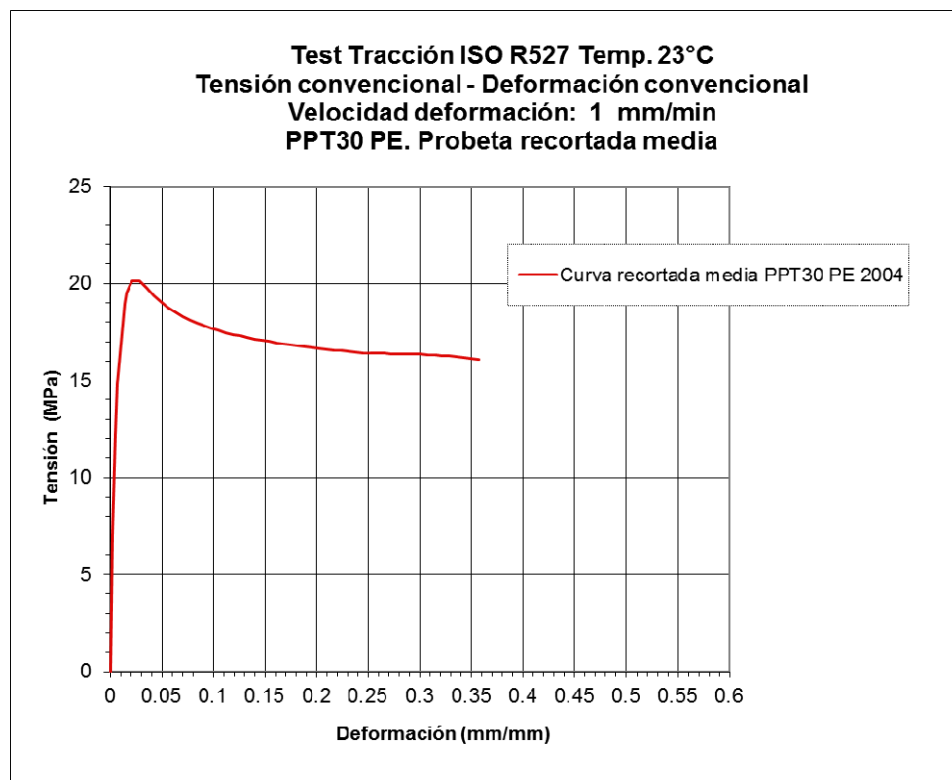


Figura 5.34. Curva material recortado PPT30 PE 2004. Trazo medio

5.4.5.3.2. Componente Pieza Estructural PE inyección 2003 / test 2013 (PE 2003-13)

En este caso, para las muestras obtenidas del componente PE envejecido a lo largo de los 10 años, se han definido parámetros de ensayo similares: MTS Insight 100KN/10KN, velocidad de deformación de 1 mm/min (0.016 mm/seg), y tipo de probeta 1B (radio 60 mm, $L=60$ mm). Figuras 5.35 y 5.36.

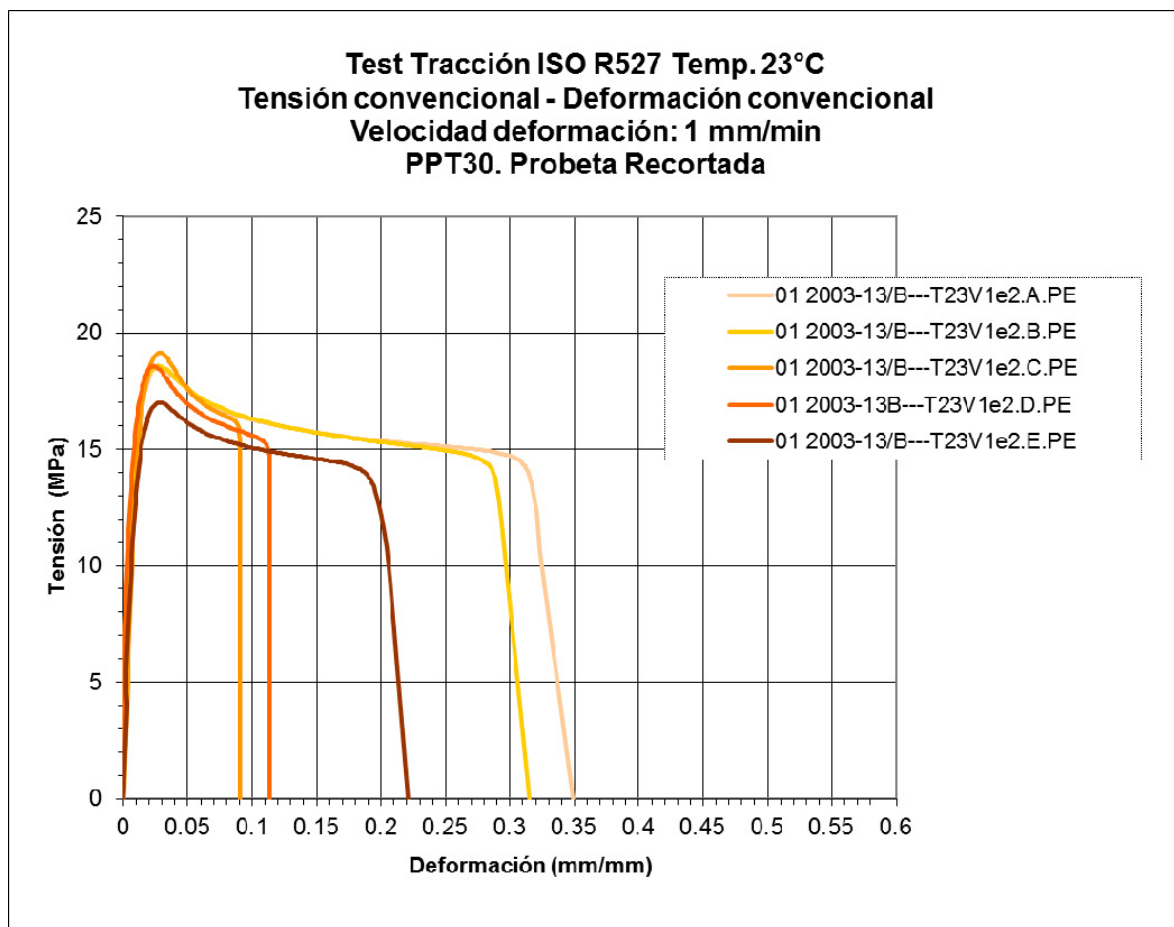


Figura 5.35. Curvas material recortado PPT30 PE 2003-2013. Curvas medias 5 zonas

La curva representativa media (Figura 3.6) se utilizará para la comparativa con la obtenida de muestras recortadas sin el efecto de la radiación solar.

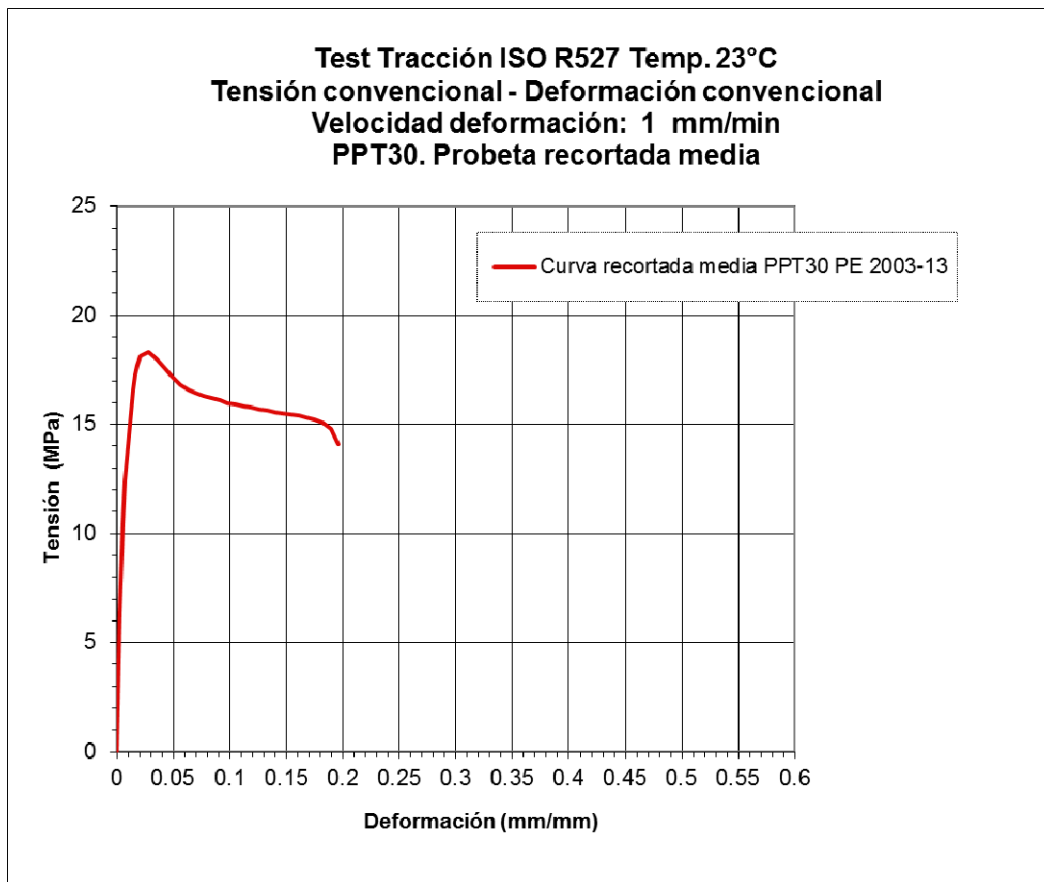


Figura 5.36. Curva material recortado PPT30 PE 2003-13. Curva media

5.4.5.4. Parámetros del ensayo material recortado ABS

Las seis últimas curvas presentadas se refieren al material ABS, extraídas de dos componentes distintos.

5.4.5.4.1. Componente Inserto INS inyección 2008 (INS 2008)

Con un procedimiento equivalente se lograron los datos mostrados a continuación para el ABS sustraído dos piezas Inserto. Componentes obtenidas en la inyección realizada en el año 2008. Los ensayos se llevaron a cabo en días posteriores a la inyección.

En este caso los variables fijadas de ensayo son: tipología 1B (radio de 60 mm, $L=110$ mm), máquina universal MTS Alliance RF100 y velocidad de deformación sostenida de 5 mm/min (0.083 mm/seg). Figuras 5.37 y 5.38.

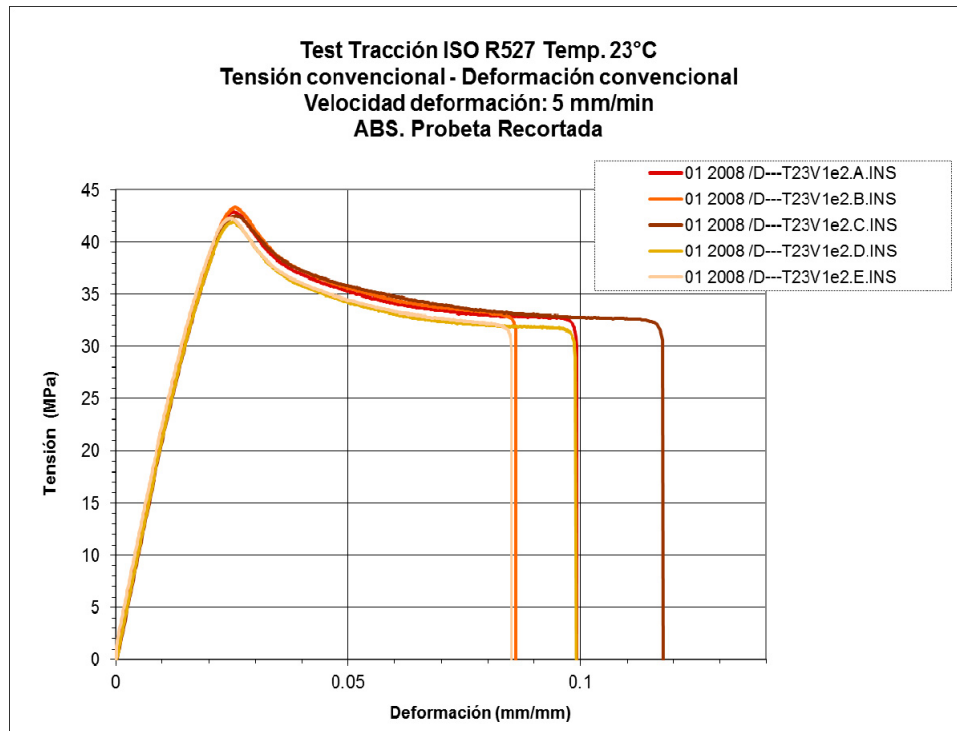


Figura 5.37. Curvas material recortado ABS INS 2008. Curvas medias 5 zonas

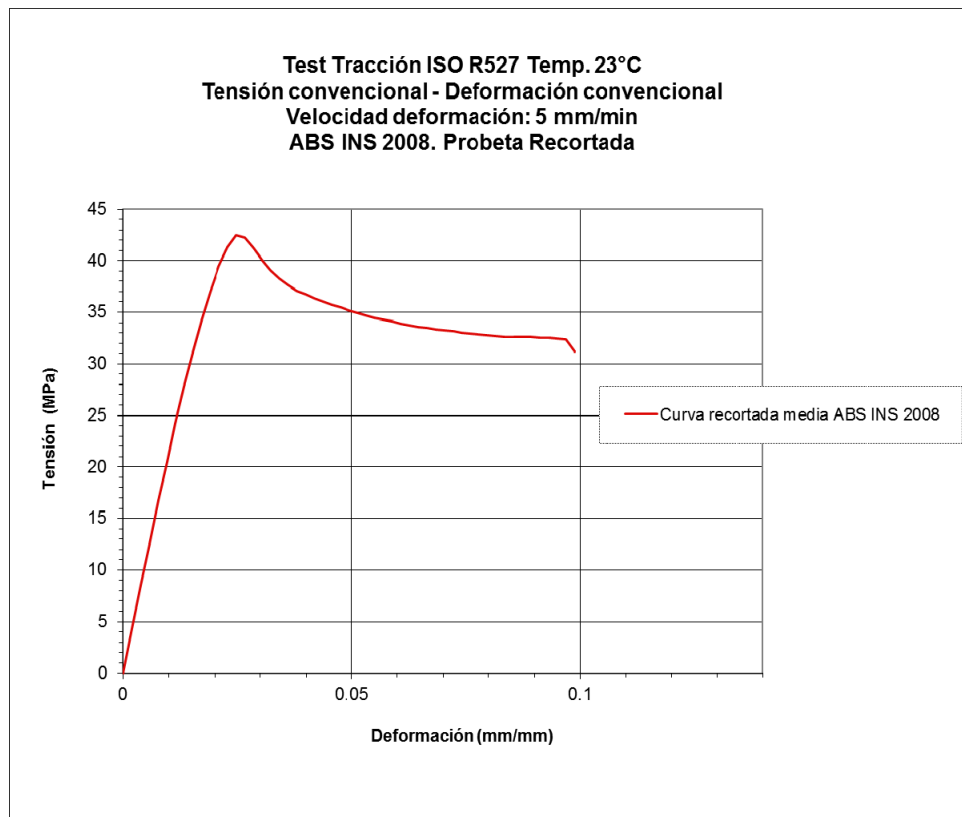


Figura 5.38. Curva material recortado ABS INS 2008. Trazo medio

5.4.5.4.2. Componente Inserto INS inyección 2012 (INS 2012)

Muestra del mismo componente que en el caso anterior, pero en línea de producción del 2012, por lo que los resultados reflejan la influencia de los parámetros de inyección establecido en ese momento de producción.

Los parámetros de ensayo para esta extracción, en este caso, son: MTS Insight 100KN/10KN, velocidad de deformación de 5 mm/min, y tipo de probeta 1B (radio 60 mm, $L=120$ mm).

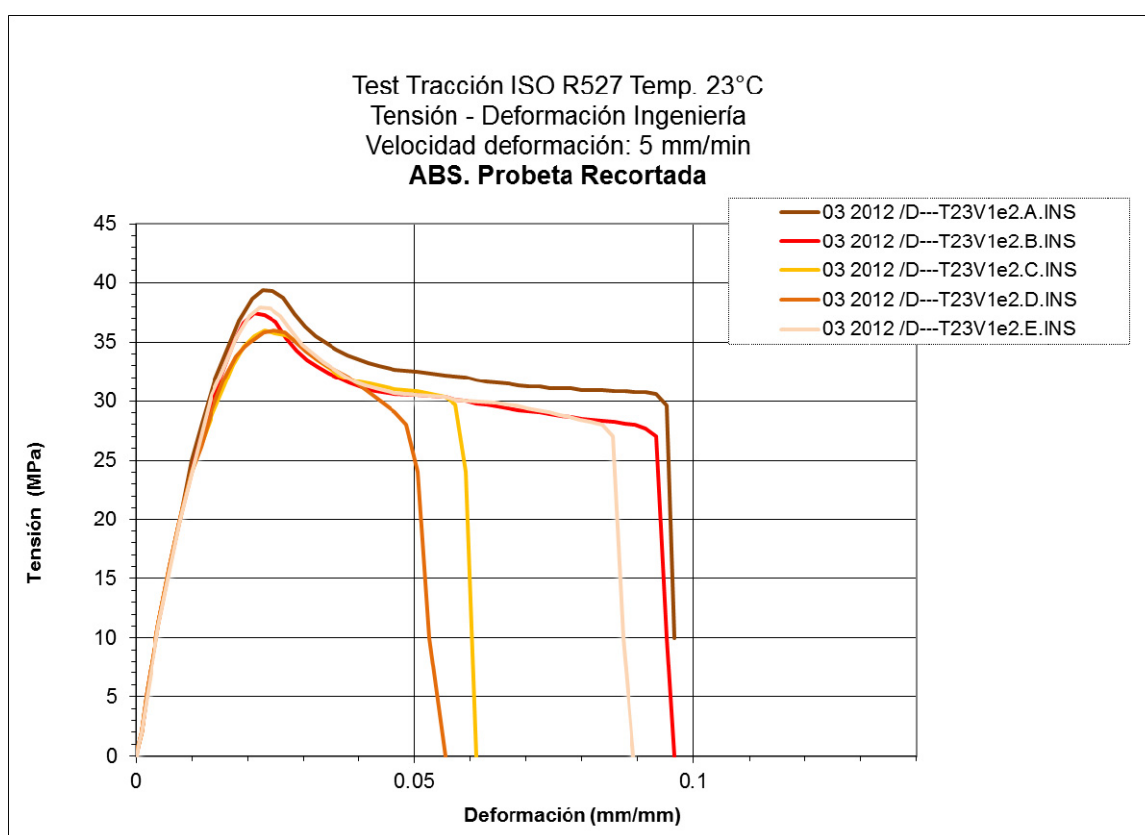


Figura 5.39. Curvas material recortado ABS INS 2012. Curvas medias 5 zonas

En este caso, en comparativa con las obtenidas para la inyección 2008, existe mayor dispersión tanto por lo que se refiere a la deformación máxima como la forma de la curva en la zona del límite máximo.

De igual forma que en los casos anteriores se recoge la curva media para su uso en la determinación del factor de escala (Figura 5.40).

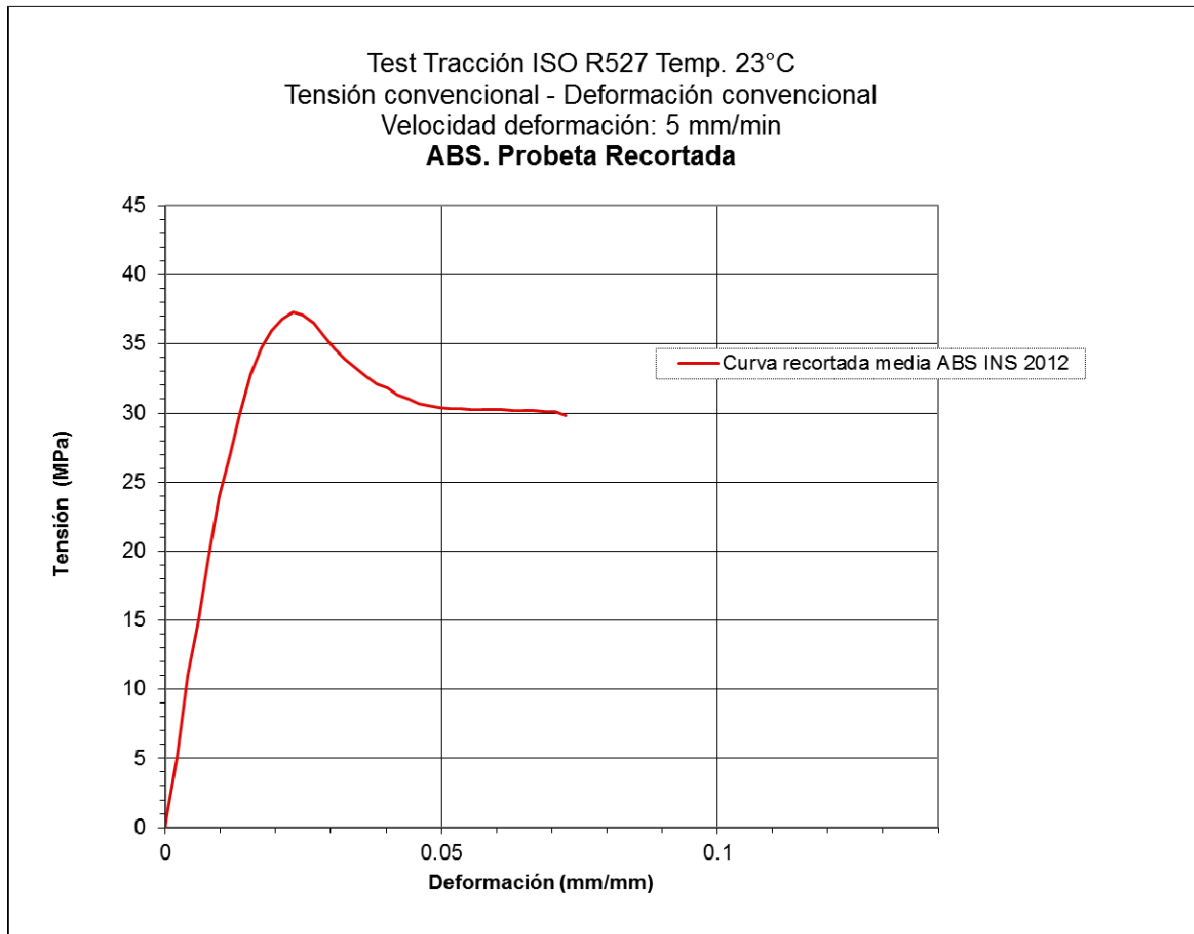


Figura 5.40. Curva material recortado ABS INS 2012. Trazo medio

5.4.5.4.3. Componente Armazón Asidero AA inyección 2012 (AA 2012)

En la siguiente página se presentan los datos obtenidos para el Armazón Asidero. Se han usado 5 piezas para lograr 5 muestras en zona A, única área disponible para la extracción.

Se ha fijado los parámetros de ensayo como: máquina universal Instron 3365, velocidad de deformación de 5 mm/min, y tipo de probeta 1BA (radio 60 mm, $L=60$ mm).

Las figuras presentan una rotura con valores de deformación longitudinal inferiores a los dos casos anteriores (mismo material). Se muestra mayor fragilidad debido al proceso de inyección y diseño de este componente.

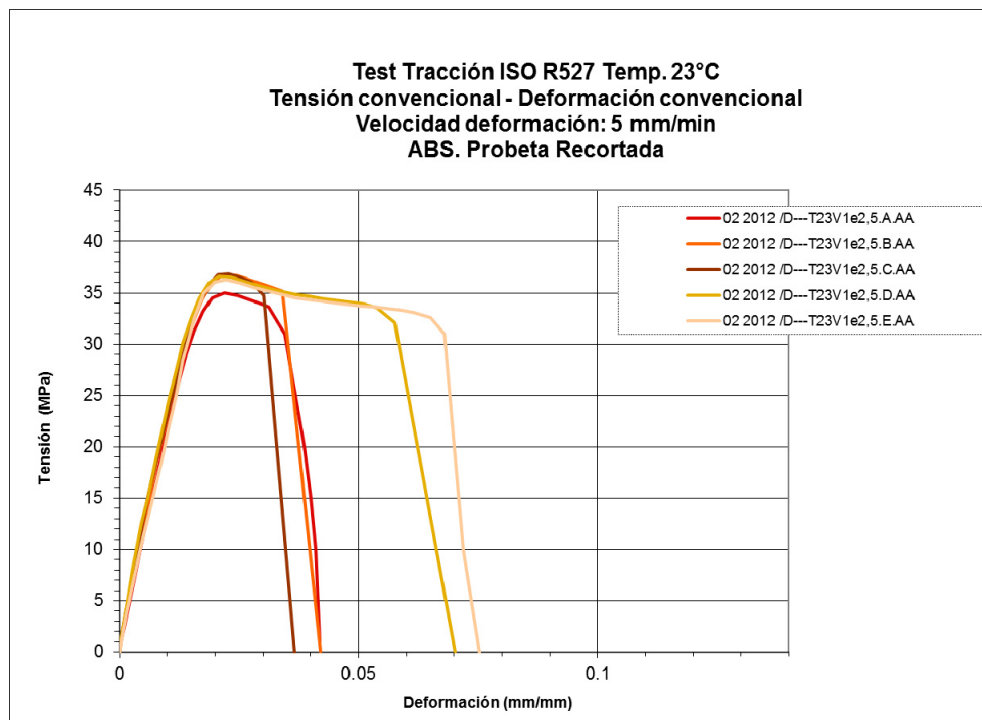


Figura 5.41. Curvas material recortado ABS AA 2012. Curvas medias 5 zonas

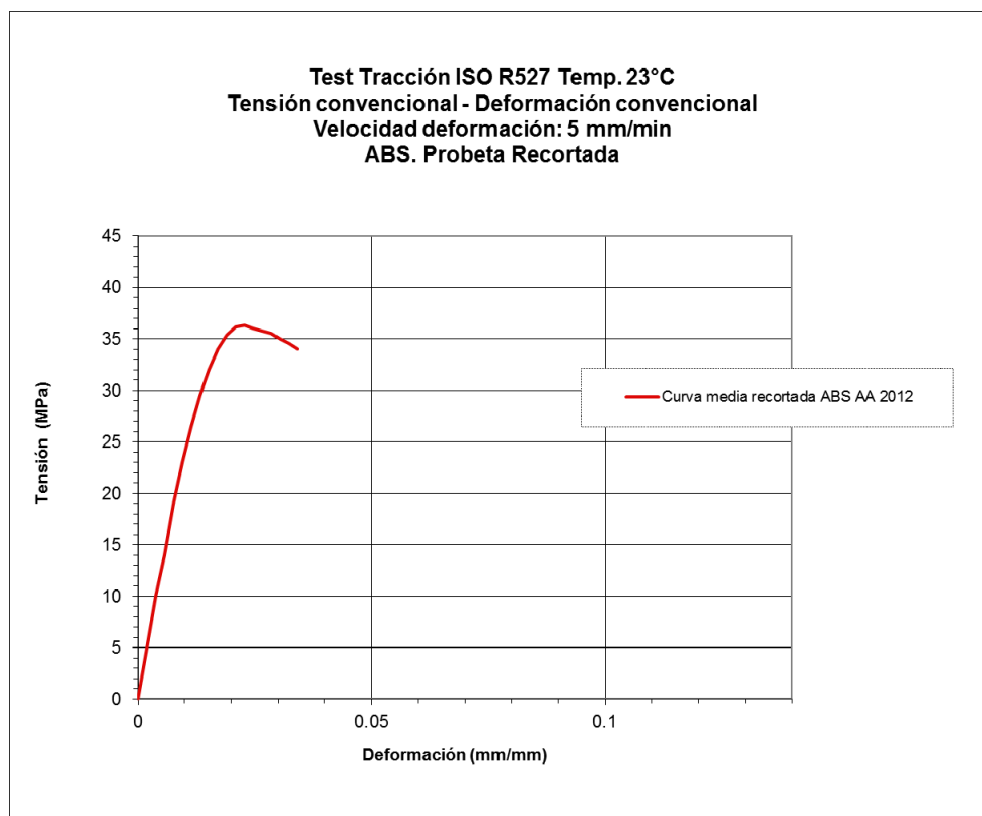


Figura 5.42. Curva material recortado ABS AA 2012. Trazo medio

5.4.5.5. Factores de Escala Máster para las familias PPT y ABS

Se realizan las medias de las curvas de componentes, con el fin de obtener el factor de escala por material, y así lograr finalmente el factor de escala master por familia, $FE_{Máster}(\%)$.

A continuación se presentan, mediante un esquema, los datos de componentes obtenidos y las acciones a realizar. Aquellos componentes marcados en gris se tratan de forma adicional, por lo que no se introducirán en el procedimiento de cálculo del Factor de Escala Máster para el PPT.

Material	PPT16a		PPT16b			PPT30	
Componente	CC 2004	CC 2002-04	INS 2008	PD 2013	PT 2013	PE 2004	PE 2003-13
$FE_{Comp-j}(\%)$	$FE_{CC\ 2004}(\%)$ -		$FE_{INS\ 2008}(\%)$	$FE_{PD\ 2013}(\%)$	$FE_{PT\ 2013}(\%)$	$FE_{PE\ 2004}(\%)$	-
$FE_{Mat-i}(\%)$	$FE_{PPT16a}(\%)$		$FE_{PPT16b}(\%)$			$FE_{PPT30}(\%)$	
$FE_{Máster}(\%)$	$FE_{Máster\ PPT}(\%)$						

Material	ABS		
Componente	INS 2008	INS 2012	AA 2012
$FE_{Comp-j,\ iny-k}(\%)$	$FE_{INS\ 2008}(\%)$	$FE_{INS\ 2012}(\%)$	
$FE_{Comp-j}(\%)$	$FE_{INS}(\%)$		$FE_{AA\ 2012}(\%)$
$FE_{Mat-i}(\%)$	$FE_{ABS}(\%)$		
$FE_{Máster}(\%)$	$FE_{Máster\ ABS}(\%)$		

Figura 5.43. Cuadro de acciones sobre curvas recortadas. Cálculo $FE_{Máster,i}(\%)$

Como puede apreciarse, el $FE_{PPT16a}(\%)$ se obtiene directamente del componente Cuerpo Consola CC 2004 y el $FE_{PPT30}(\%)$ de la Pieza Estructural PE 2004.

El valor del factor de escala de un componente se obtiene mediante comparativa de la tensión máxima de la curva media recortada versus la ideal (Ecuación 4.1), ambas de ingeniería.

En las siguientes imágenes puede observarse las distintas curvas para los 5 componentes inyectados con PPT16. En cada gráfico se superpone la curva recortada media con la ideal, para visualizar la caída debido al proceso de inyección.

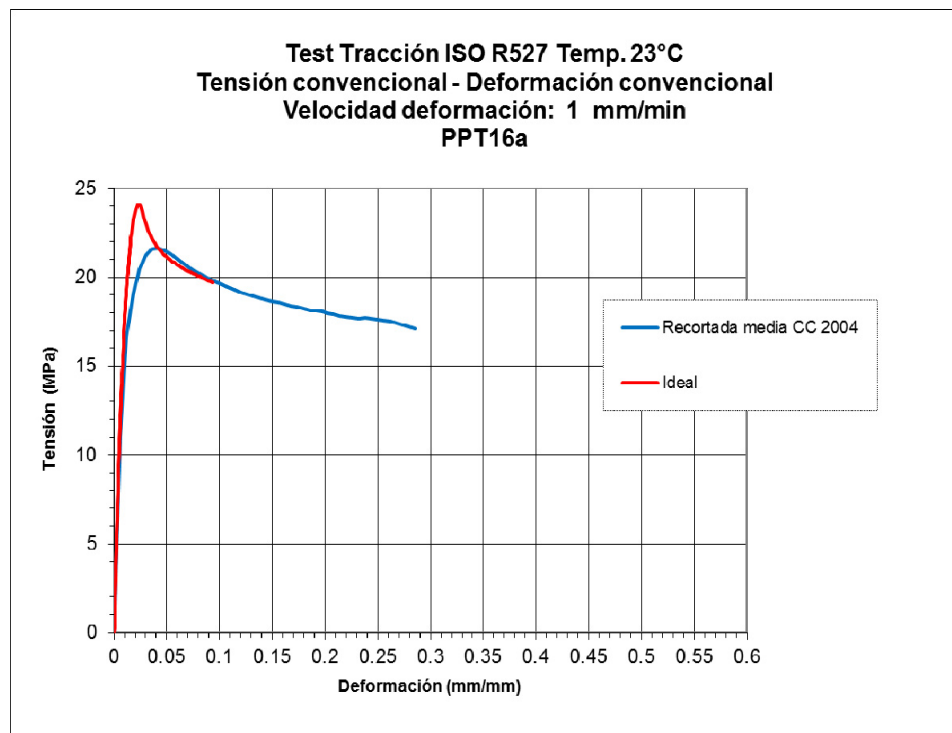


Figura 5.44. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente CC 2004

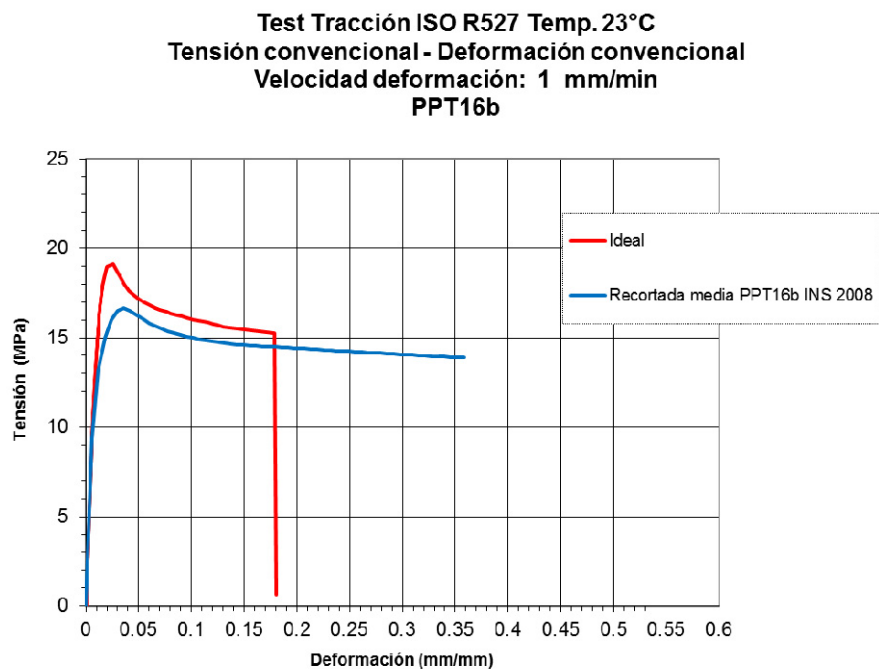


Figura 5.45. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente INS 2008

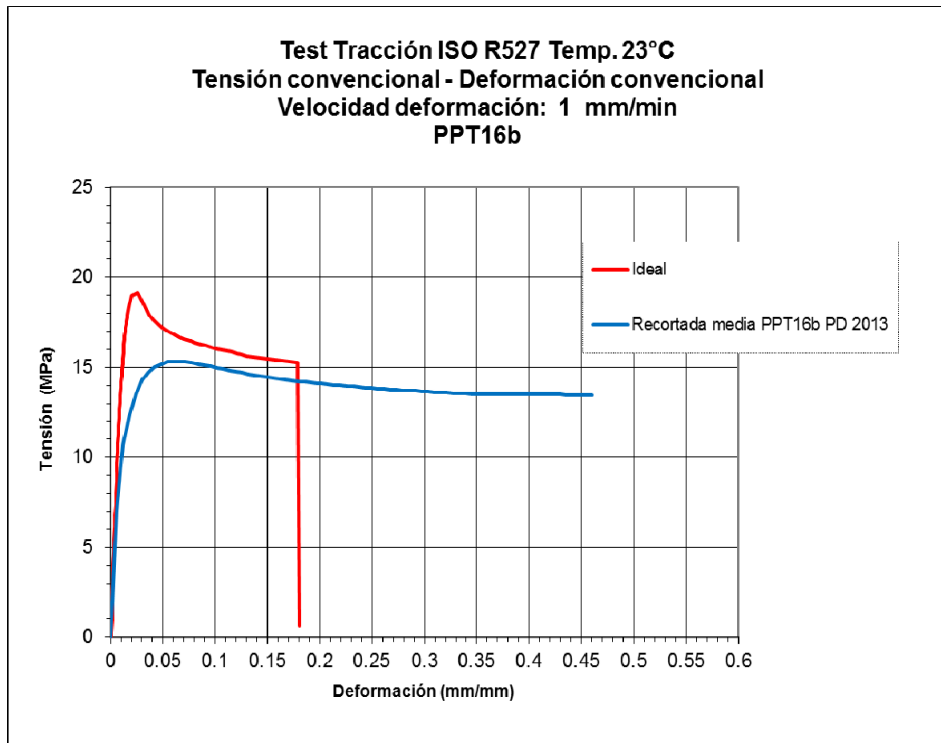


Figura 5.46. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente PD 2013

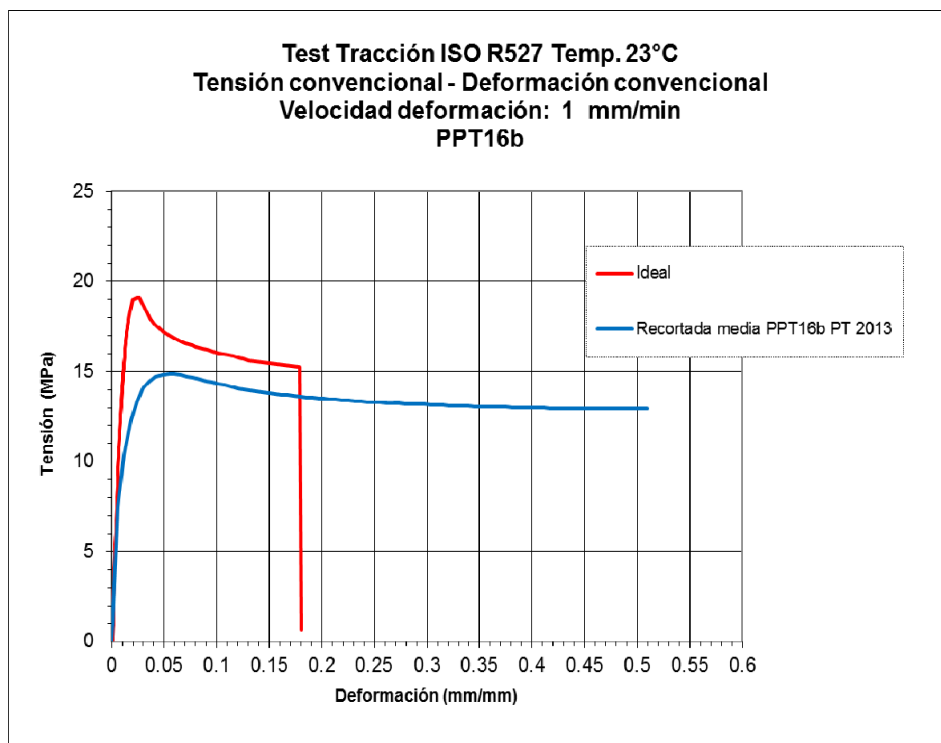


Figura 5.47. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente PT 2013

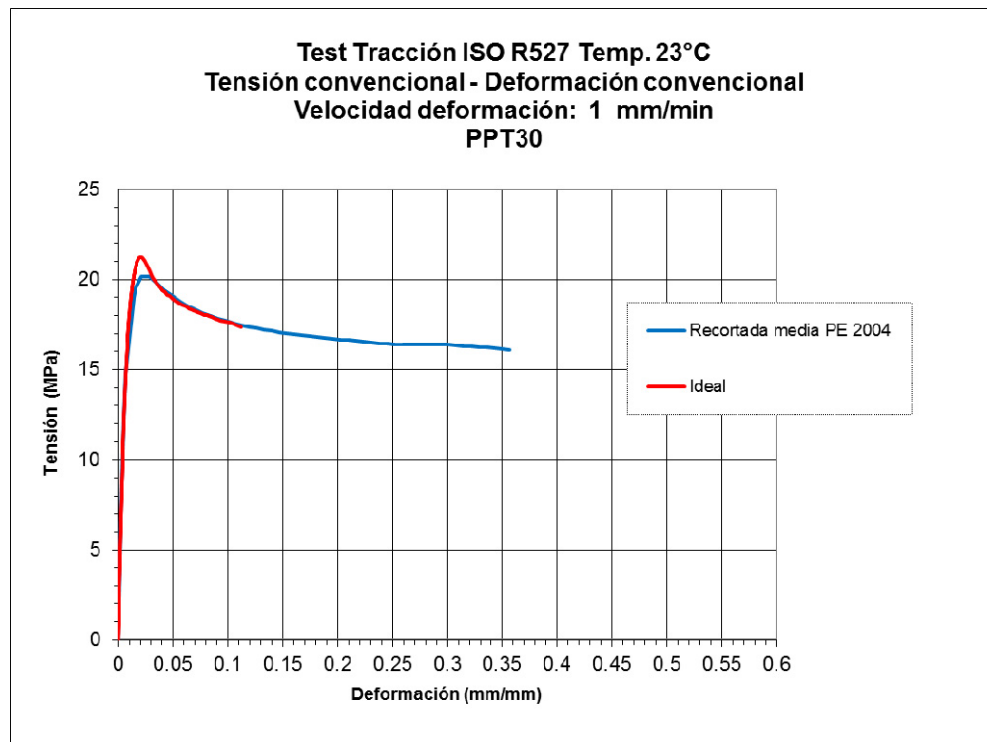


Figura 5.48. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente PE 2004

La tabla 5.7 resume los datos hallados:

Familia	Componente	Material	Temp. (°C)	σ_{Max} Ideal (MPa)	σ_{Max} recort. media (MPa)	$\Delta\sigma_{Max}$ (MPa)	FE_{Comp} (%)	$FE_{Material}$ (%)	$FE_{Máster}$ (%)
PPT	CC 2004	PPT16a	23	24.1	21.6	-2.5	10	10	11
	INS 2008	PPT16b	23	19.1	16.6	-2.5	13	18	
	PD 2013		23		15.3	-3.8	20		
	PT 2013		23		14.9	-4.2	22		
	PE 2004	PPT30	23	21.2	20.1	-1.1	5	5	

Tabla 5.7. Factor de Escala Máster familia PPT

Se procede de igual forma para la familia ABS, a partir de los datos obtenidos de los 3 componentes. Las figuras siguientes muestran las curvas obtenidas. La tabla 5.8 recoge los valores para esta segunda familia.

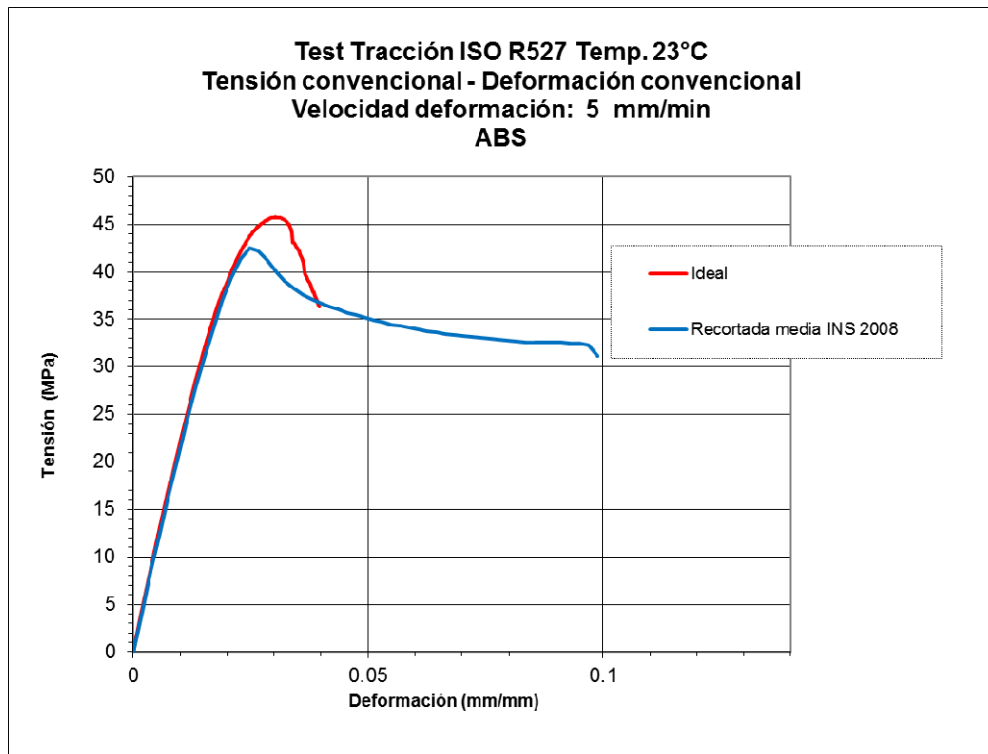


Figura 5.49. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente INS 2008

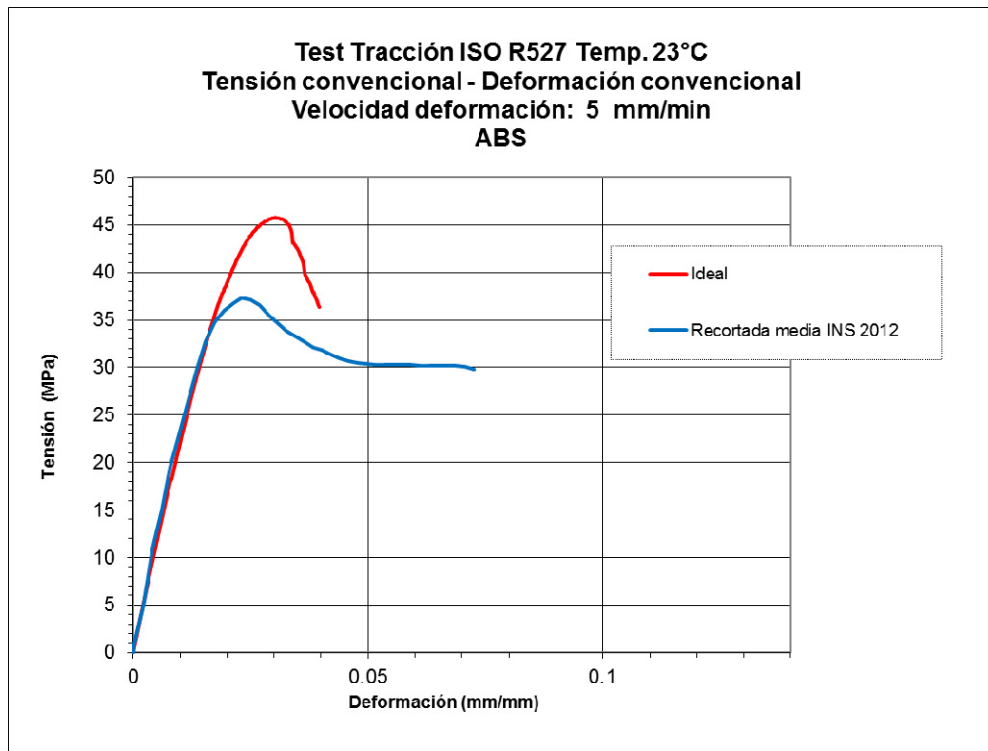


Figura 5.50. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente INS 2012

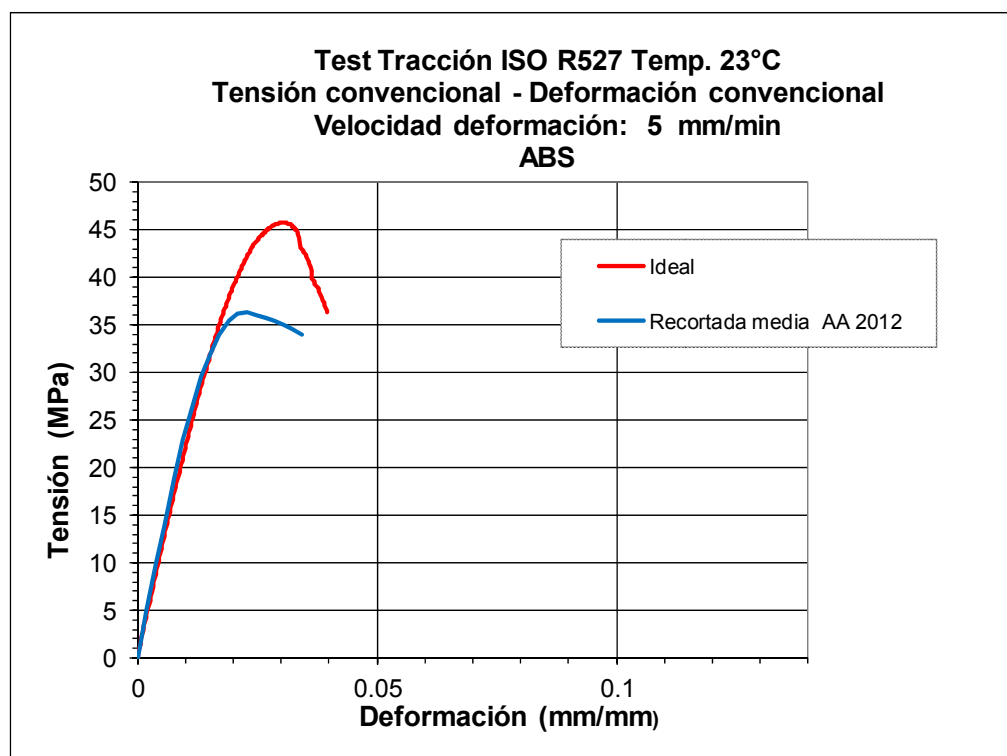


Figura 5.51. Curva Ideal versus Curva recortada media. Componente AA 2012

Familia	Componente	Material	Temp. (°C)	σ_{Max} Ideal (MPa)	σ_{Max} recort. media (MPa)	$\Delta\sigma_{Max}$ (MPa)	$FE_{Comp-j, iny-k}$ (%)	FE_{Comp-j} (%)	FE_{Mat-i} (%)	$FE_{Máster}$ (%)
ABS	INS 2008	ABS	23	45.76	42.5	-3.3	7	13	17	17
	INS 2012	ABS	23		37.3	-8.5	19			
	AA 2012	ABS	23		36.3	-9.5	21			

Tabla 5.8. Factor de Escala Máster familia ABS

5.5. DEFINICIÓN DE LAS CURVAS DE CÁLCULO PARA LOS MATERIALES DE ESTUDIO

A partir del procedimiento especificado en el capítulo anterior, se halla la curva de cálculo del ABS a utilizar en la simulación estructural de validación (modelo Tapa Asidero), correspondiente al capítulo 6 de la presente tesis. Este mismo ABS se utiliza para la inyección de dos piezas del modelo Módulo Panel Puerta MPP, que servirá para la verificación de la metodología presentada. Además es necesario obtener las dos curvas de cálculo para el material PPT16b y el PPT30.

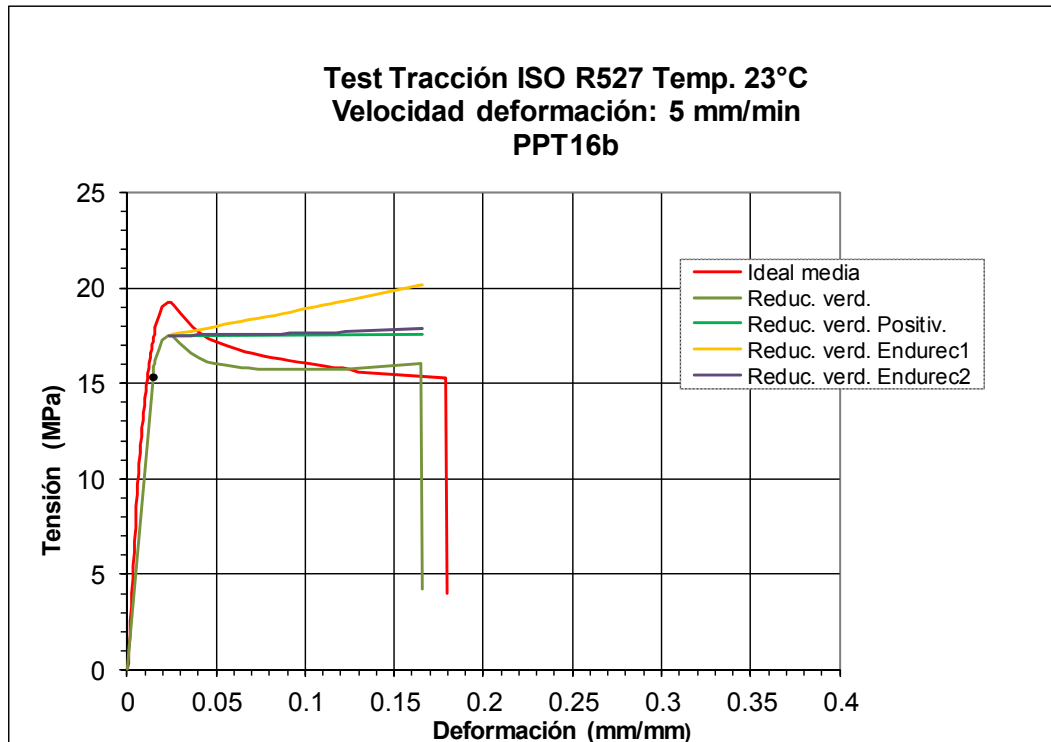


Figura 5.52. Curvas de cálculo PPT16b. Detalle corrección zona endurecimiento

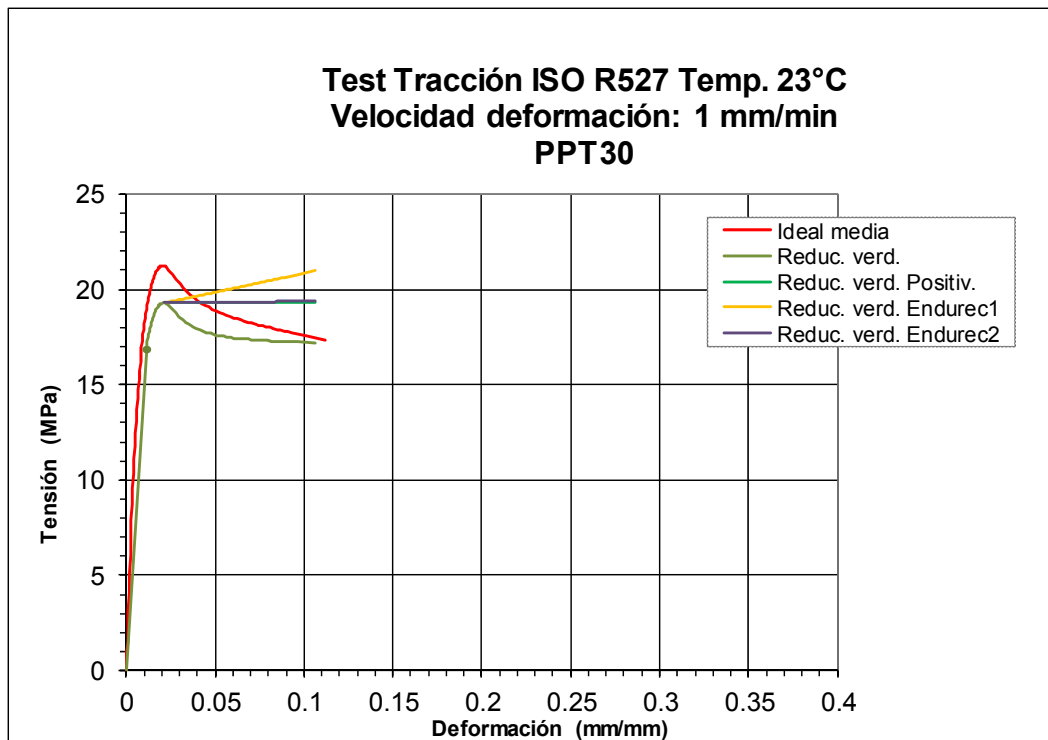


Figura 5.53. Curvas de cálculo PPT30. Detalle corrección zona endurecimiento

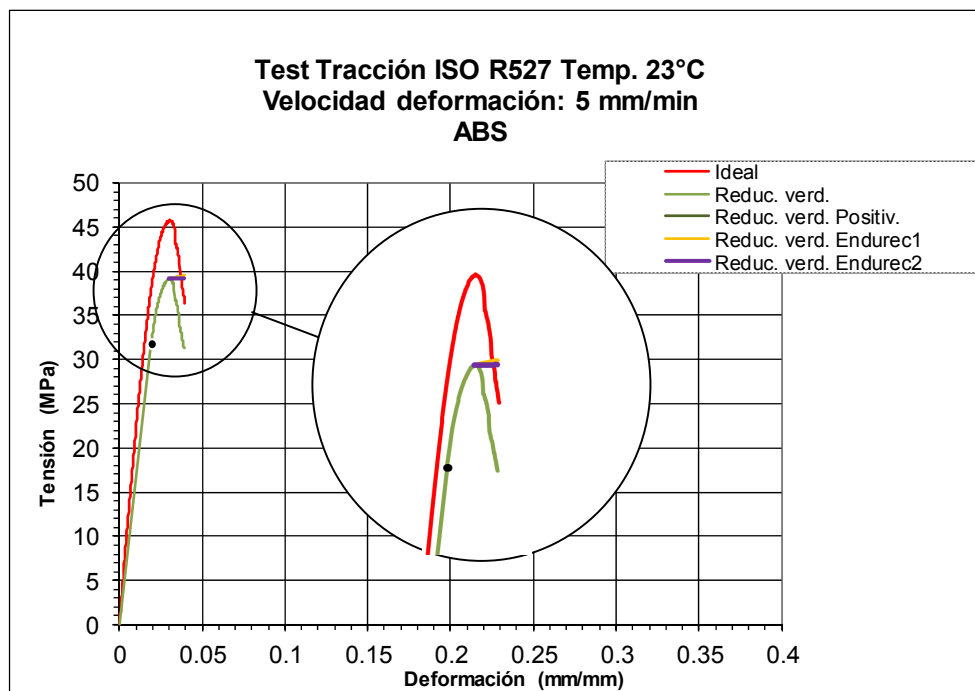


Figura 5.54. Curvas de cálculo ABS. Detalle corrección zona endurecimiento

En las curvas 5.52, 5.53 y 5.54 se definen las 3 curvas de cálculo posibles a partir de la curva ideal: Reducida verdadera positiva, Reducida verdadera *Endurec1* y Reducida verdadera *Endurec2*.

La comparativa de las 3 posibles curvas de cálculo (verdes) con la recortada verdadera media (azul) correspondiente, permite validar el modelo de corrección. En el gráfico 5.55 puede verse la ligera tendencia positiva de la pendiente más allá de la tensión máxima, para la curva de referencia. El mismo razonamiento se efectúa para el material PPT30 (Figura 5.56). Se cree que el modelo de corrección *Endurec2* es el que representa mejor el comportamiento elastoplástico de endurecimiento para esta familia de materiales, si bien en el caso del PPT30 también podría ser válida la modificación a valores positivos, que es casi coincidente. Se añade también la curva de cálculo utilizada habitualmente en la industria (curva roja, ideal verdadera), con límite de fluencia falseado a valores muy bajos para seguir la tendencia de toda la curva.

Para el material ABS, con un tramo de deformación plástica corto y de pronunciada pendiente negativa, tanto el modelo de *Endurec2* como el de corrección a valores positivos resultan los más adecuados. Esta elección se corroborará en el próximo capítulo.

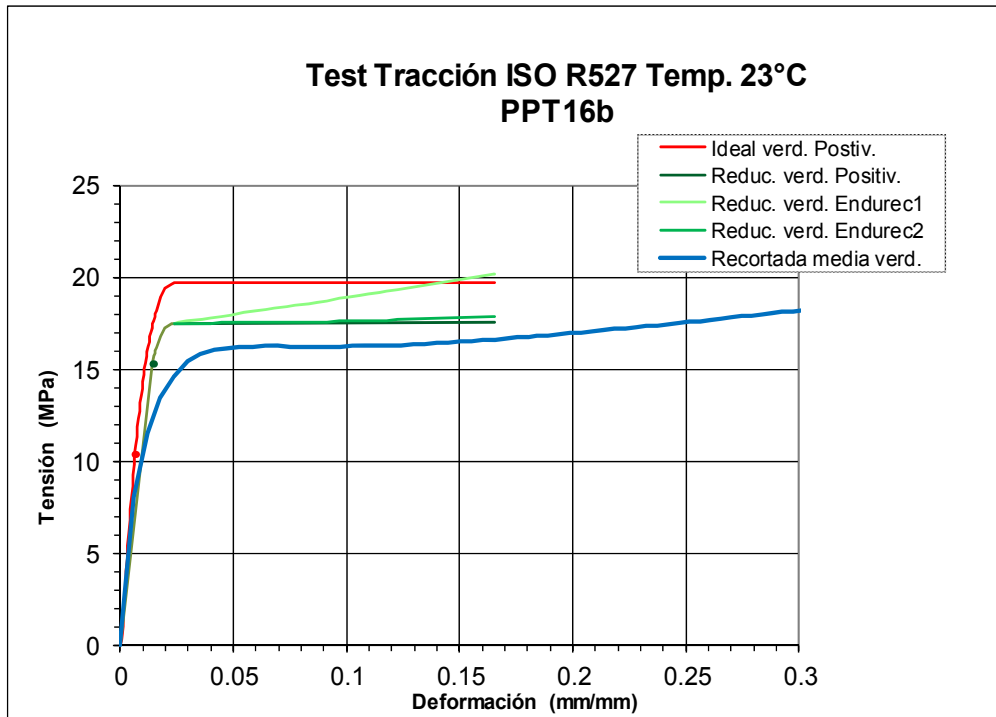


Figura 5.55. Curvas de cálculo versus curva recortada media verdadera. Material PPT16b

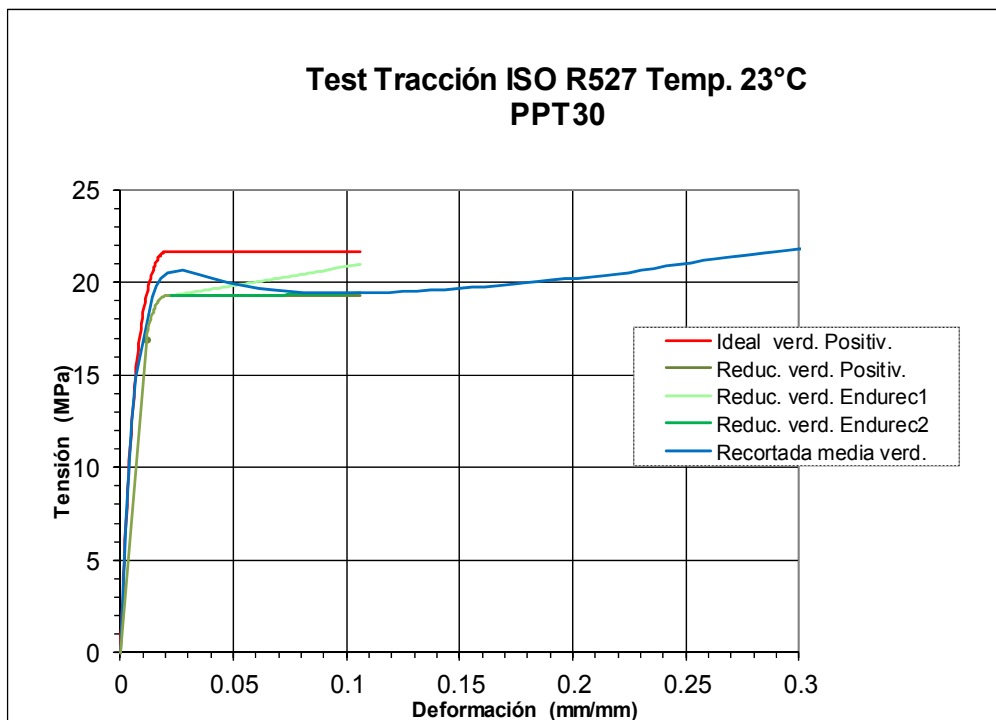


Figura 5.56. Curvas de cálculo versus curva recortada media verdadera. Material PPT30

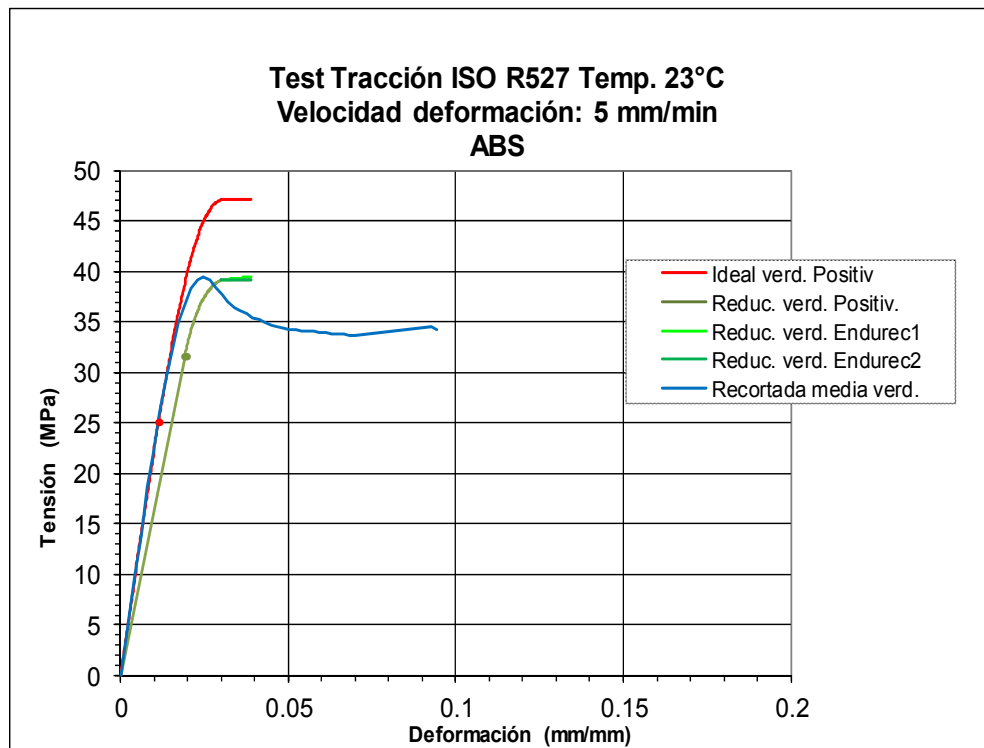


Figura 5.57. Curvas de cálculo versus curva recortada media verdadera. Material ABS

Para finalizar, debe recordarse que en algunos códigos es necesario introducir el tramo elastoplástico mediante valores de plasticidad puros. Las simulaciones de los siguientes capítulos se han realizado mediante el software Abaqus, por lo que se ha utilizado la Ecuación 4.7 para obtener las deformaciones plásticas.

5.6. RESULTADOS DE LOS COMPONENTES CON ENVEJECIMIENTO

Tal como se ha presentado a lo largo del estudio, dos componentes se han tratado en paralelo, para una primera visualización del efecto del envejecimiento natural sostenido a lo largo de los años.

En el caso del componente Cuerpo Consola, el año de inyección corresponde al 2002 mientras que la obtención de la curva a tracción se realizó en el 2004 (octubre 2002-diciembre 2004). La comparativa realizada en la Figura 5.58 muestra una pobre caída de la curva debido al proceso de degradación de estos dos años de radiación UV.

En el caso de la Pieza Estructural, el efecto de los 10 años (marzo 2003-abril 2013) se recoge en la superposición de curvas medias de la Figura 5.59.

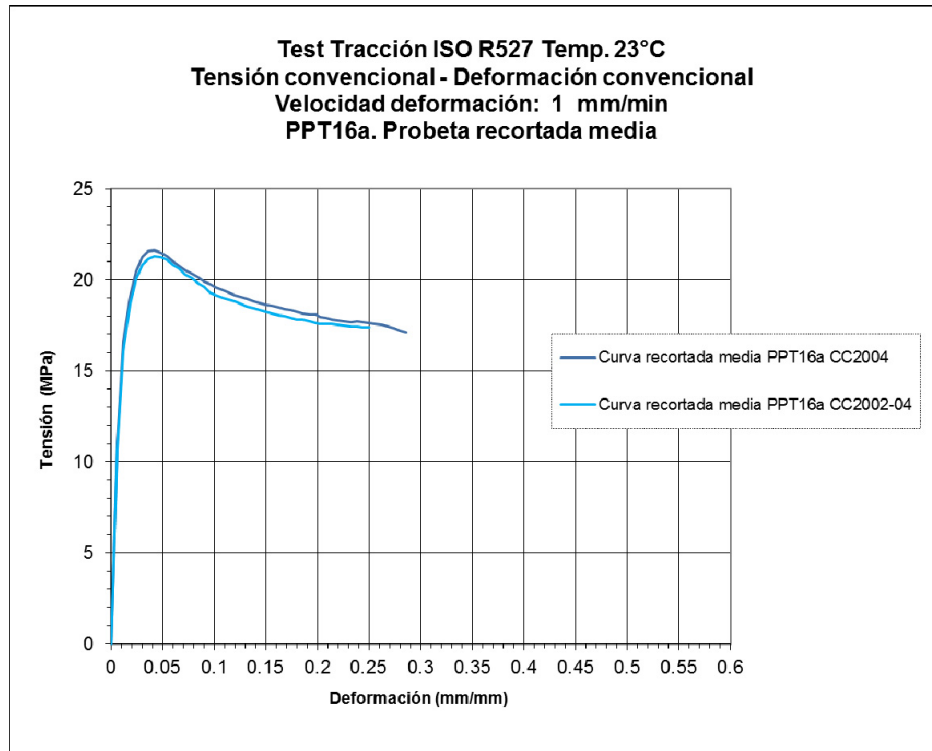


Figura 5.58. Curva CC 2004 versus CC 2002-04. Material PPT16a

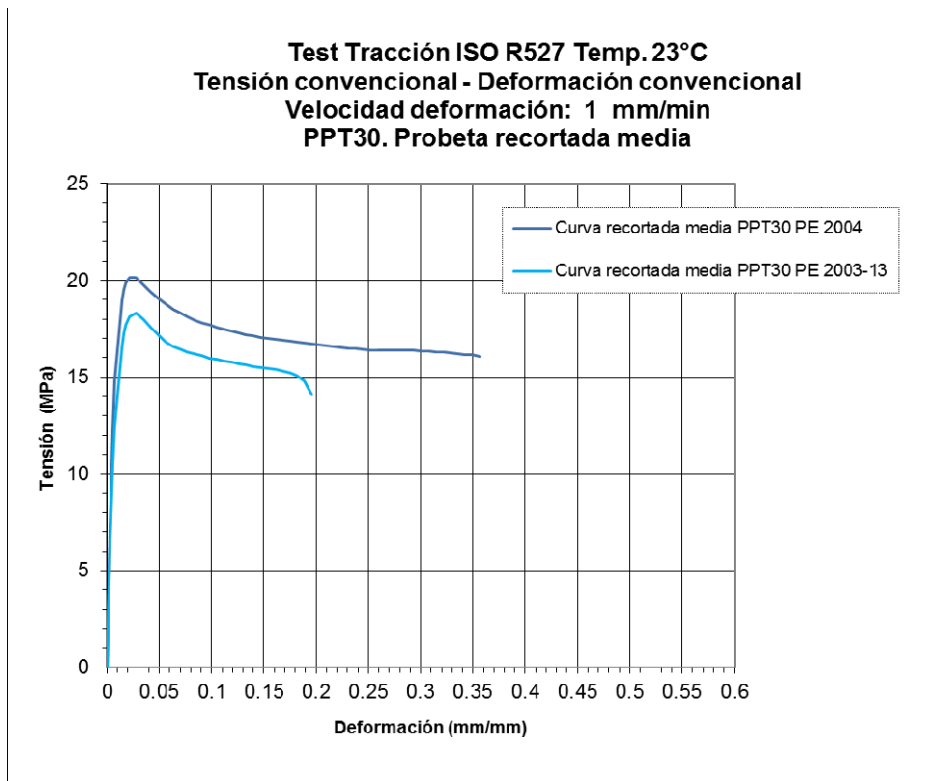


Figura 5.59. Curva PE 2004 versus PE 2003-13. Material PPT30

Como puede apreciarse, en este caso, el efecto es más notable. La disminución del valor de la tensión máxima es del 9%.

En base a estos datos, se estima que el efecto de envejecimiento puede ser significativo en los últimos años de vida del producto. Existe una predisposición al cambio de vehículo debido a las necesidades del consumo actual, que provoca un final de vida anticipado del mismo. Por este motivo debe situarse el efecto del envejecimiento a 7 años, e incluso contemplar un periodo menor, en referencia al tiempo de uso de un vehículo. El valor del 9% representa una referencia máxima para el material PPT30. Por otro lado, tanto en el caso del componente Cuerpo Consola como el de la Pieza Estructural, se ha dispuesto de pocas piezas, por lo que los datos obtenidos deben tomarse como referencia y no como un valor representativo para poder introducirse en la metodología actual.

El procedimiento llevado a cabo para acondicionar las muestras de este ensayo no resulta viable a efectos de simplicidad, para un efecto industrial. Un tiempo de exposición del componente de 10 años no resulta factible, incluso bajando a secuencias de 5 años. Si bien esta técnica de exposición directa sin aceleración se cree más limpia en comparación con las técnicas actuales de envejecimiento, que pueden introducir reacciones químicas, los tiempos son excesivamente largos. Debe tenerse en cuenta la dificultad de garantizar constantes las condiciones ambientales a lo largo de los años, sin introducir ningún agente más que la propia evolución climatológica a lo largo del tiempo.

En coherencia con estos puntos, no se contempla la estimación del envejecimiento natural en la metodología presentada. Sin embargo, teniendo en cuenta el nivel de caída detectado para un rango de 10 años, resulta interesante pensar en futuras investigaciones respecto a esta variable, pudiéndose definir un nuevo factor de escala que tuviera en cuenta este efecto.

5.7. BIBLIOGRAFIA

- [1] “UNE-EN ISO 527-2. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.” AENOR, Madrid, 2012.
- [2] T. Urdillo, “Estudio reológico Consola Central.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2002.
- [3] E. Esteras and T. Urdillo, “Simulación de llenado. Inserto. Technical report n. CAE/EU07/082.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2007.
- [4] T. Urdillo, “Panel LH 3P. Optimización de las líneas de tigre.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2009.
- [5] T. Urdillo, “Estudio reológico Armazón.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2002.
- [6] “UNE-EN ISO 291 Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos.” 2006.

CAPÍTULO 6

VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA

Se selecciona un ensayo de flexión acusada con cierta componente torsional como test de validación para la propuesta de caracterización presentada para el caso práctico. Se implementan modelos MEF para estudiar su respuesta frente al ensayo físico. Se evalúa la sensibilidad de los últimos parámetros a fijar, a partir de los resultados obtenidos.

6.1. SELECCIÓN DEL TIPO DE TEST DE VALIDACIÓN. MODELO ASIDERO

6.1.1. DOMINIO MODELO ASIDERO

La pieza de estudio corresponde al conjunto asidero de un panel puerta de un automóvil. Este conjunto está formado por dos elementos: Tapa Asidero y Armazón Estructural. Se selecciona el componente Tapa Asidero como dominio de estudio.

La Tapa Asidero es básicamente un perfil abierto de espesor constante (2.5 mm) fijado al componente Armazón Estructural mediante clips y posicionadores. La sección

transversal es en forma de C, adquiriendo cierta rigidez debido a las aletas laterales, aunque la función estructural se asocia plenamente al Armazón Estructural.

Esta pieza se obtiene por inyección del material ABS tratado en la presente tesis. Su peso total se encuentra próximo a los 90 gramos.

La Tapa Asidero, una vez conectada con el Armazón Estructural y ensamblada en la puerta, recibe acciones de tiraje de mano, por lo que las cargas suelen localizarse en la zona central del conjunto tirador.



Figura 6.1. Pieza Tapa Asidero

6.1.2. SELECCIÓN DEL TIPO DE ENSAYO

Se escoge la Tapa Asidero debido a su flexibilidad, siendo posible definir un ensayo de flexión que guarde cierta relación con el ensayo que recibe el conjunto cuando se encuentra ensamblado en la puerta. En comparación al Armazón Estructural, la Tapa Asidero permite tener valores mayores de tensión axial (tracción-compresión) debidos a la flexión. Tal como se ha comentado en anteriores capítulos, es necesario evaluar el modelo constitutivo de Von Mises más allá del comportamiento axial puro, para poder contemplar su bondad frente al efecto de cavitación. Un ensayo de flexión-torsión presenta áreas donde las matrices tensión tienen carácter marcadamente compresivo, existiendo componentes de cizalladura debidos al mismo cortante de la flexión, y especialmente de la torsión.

Un segundo motivo de elección es que la pieza presenta zonas para una buena definición de los puntos de fijación, para minimizar la influencia de la implementación de las constricciones en la correlación test-simulación. En situaciones donde se obtiene un nivel considerable de corrimientos, la respuesta puede verse amplificada por las rotaciones locales que suceden en las áreas de restricción, por lo que es importante

reproducir fidedignamente las interacciones sobre el dominio de estudio. No siempre los componentes permiten apoyos netos, orificios o planos para establecer dichas fijaciones.

6.1.3. SELECCIÓN TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

El ensayo se lleva a cabo a temperatura ambiente y a baja velocidad (5 mm/min).

6.1.4. CASO DE CARGA

Se impone un desplazamiento pre-escrito en y, sentido descendente, en la zona central de la tapa, zona de agarre del conjunto asidero cuando la pieza esta ensamblada.

Se fija un nivel de flecha bastante más alto del que se suele exigir al conjunto asidero (Tapa ensamblada con el Armazón), por lo que las deformaciones impuestas provocan estados de plastificación en varias zonas de la pieza. El valor de 15 mm de ensayo sobre la Tapa representa un valor doble o superior al que habitualmente presentan los conjuntos asideros diseñados en la industria del automóvil.

6.1.5. DESCRIPCIÓN DEL CRITERIO DE VALIDACIÓN

En este ejercicio híbrido test físico-simulación sólo se realizan comparaciones a nivel cuantitativo del desplazamiento máximo vertical en el punto de aplicación de la carga. Se define el parámetro de validación como el valor de sollicitación que es necesario aplicar para lograr un valor determinado de flecha en y.

6.2. ENSAYO FÍSICO

A continuación se describen aquellos detalles asociados al test físico llevado a cabo con la máquina universal MTS Insight 100KN, con la célula de carga de 10 KN.

6.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ACCIONES EXTERNAS Y CONDICIONES DE ENLACE

Se establecen dos puntos de anclaje fijo, mediante tornillos. Se descarta la posibilidad del uso de los clips de diseño que presenta la pieza, debido a la posición de éstos y a que este tipo de unión presenta pequeños movimientos locales, dificultando la correlación del ejercicio híbrido especialmente para la lectura de la flecha. Se desea minimizar las zonas de contacto, donde es necesario contemplar el coeficiente de fricción para una mejor evaluación de la sensibilidad de esta variable fricción en el ejercicio.

Se ha implementado una bancada de fijación con vigas de aluminio de sección optimizada, con una cartela para la segunda fijación (2), liberando el espacio central. Para el diseño de esta estructura se ha considerado la rigidez de estos elementos.



Figura 6.2. Bancada de ensayo para la tapa Asidero

Se ha utilizado una mordaza con pisador de contacto cilíndrico, para un buen asentamiento de éste sobre la pieza.

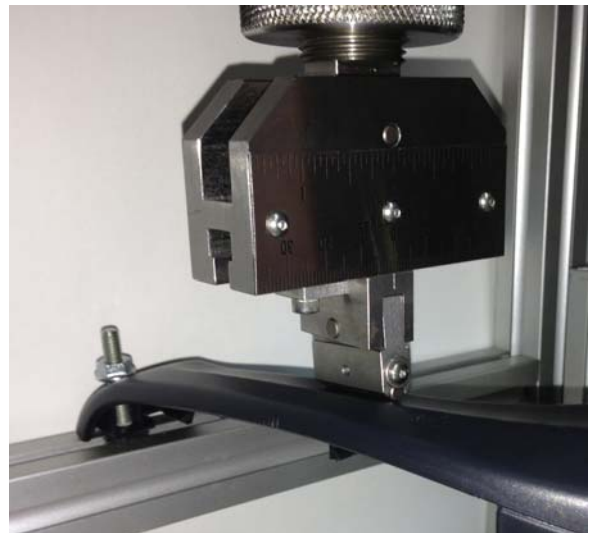
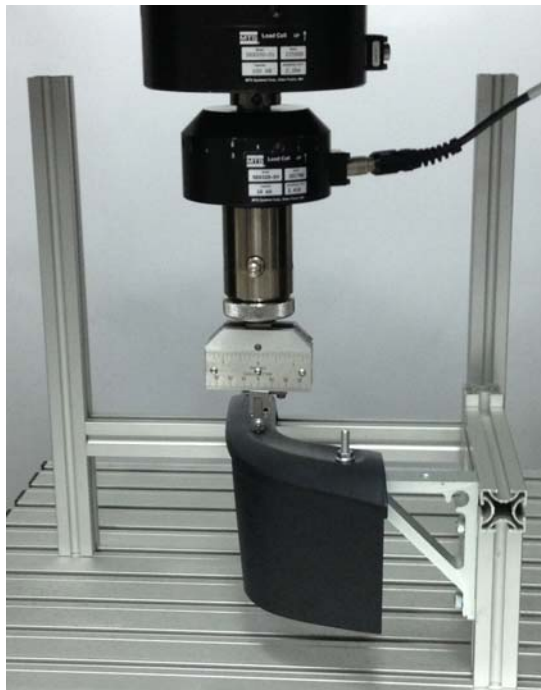


Figura 6.3. Pisador en posición para ensayo. Detalle de asentamiento sobre pieza

Se evita también una interacción puntual, logrando un mejor repartimiento del esfuerzo, acercando el test al comportamiento de la Tapa en un tiraje real. La mordaza presenta grados de libertad rotacionales para poderse adaptar a la pieza, garantizando un buen posicionamiento.

6.2.2. RESULTADOS

Se han realizado 5 ensayos, obteniéndose la curva promedio fuerza-desplazamiento mostrada.

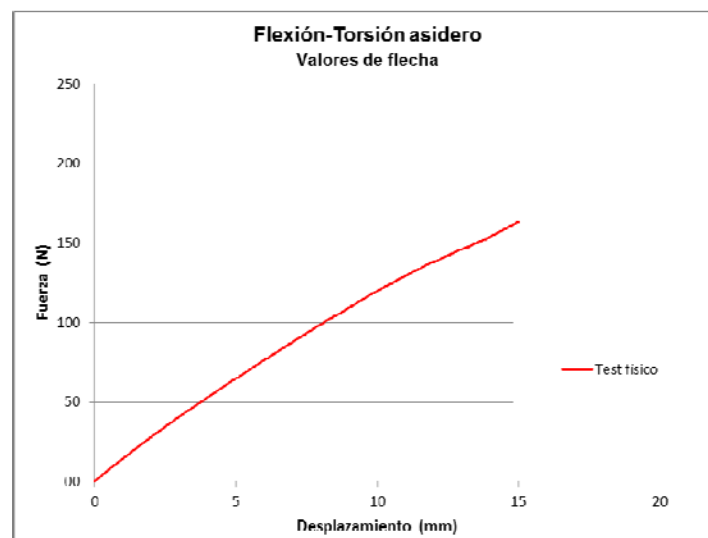


Figura 6.4. Respuesta vertical media versus fuerza aplicada, ensayo físico

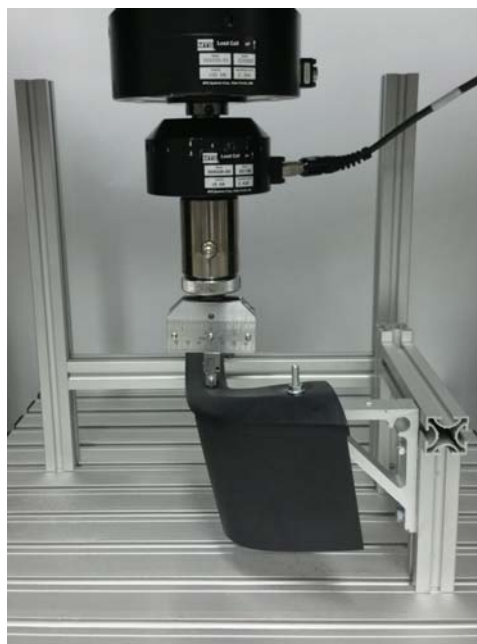


Figura 6.5. Instante del ensayo físico

6.3. MODELOS PARA SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

6.3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS MEF

Se han creado dos niveles de estudio. El primero corresponde a un modelo con elementos tipo sólido, respetando al máximo los detalles de la pieza, con tiempos computacionales más altos, pero garantizando al máximo la bondad de la respuesta. El segundo modelo, con elementos tipo placa, respeta los criterios de calidad de malla exigidos en industria para ejercicio habitual.

6.3.2. MODELIZACIÓN DEL MATERIAL

En todas las simulaciones realizadas para este ejercicio se utiliza el material ABS caracterizado según presente metodología. Se contemplan 3 curvas (Figura 5.54), para evaluar la respuesta del modelo de endurecimiento más allá de la tensión máxima: Corrección a pendientes positivas (Pendientes Positivas), ley de endurecimiento *Endurec1* y ley *Endurec2*.

6.3.3. MODELO CON ELEMENTOS 3D SÓLIDOS (TAPA SÓLIDOS)

6.3.3.1. Definición de malla

Para la preparación de este modelo se ha recibido la geometría en formato iges procedente del software CAD CATIA. El pre-proceso se ha llevado a cabo mediante el programa ANSA, de la firma Beta CAE Systems S.A., para lograr una densidad de malla adecuada, despreciando los detalles inferiores a 1 mm.

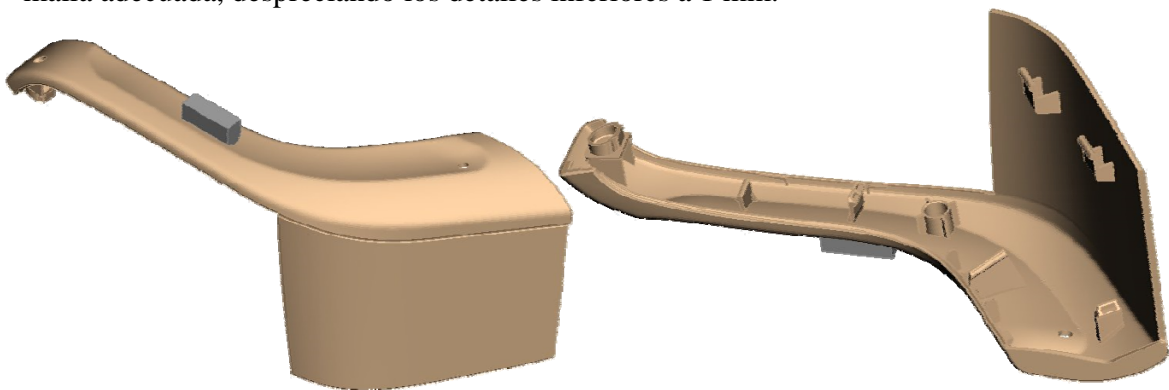


Figura 6.6. Modelo CAE Tapa Asidero, elementos sólidos

Se ha seleccionado una longitud media de arista de elemento de 1 mm. Este valor ha sido escogido como compromiso entre calidad de los resultados y tamaño total de modelo (número total de nodos).

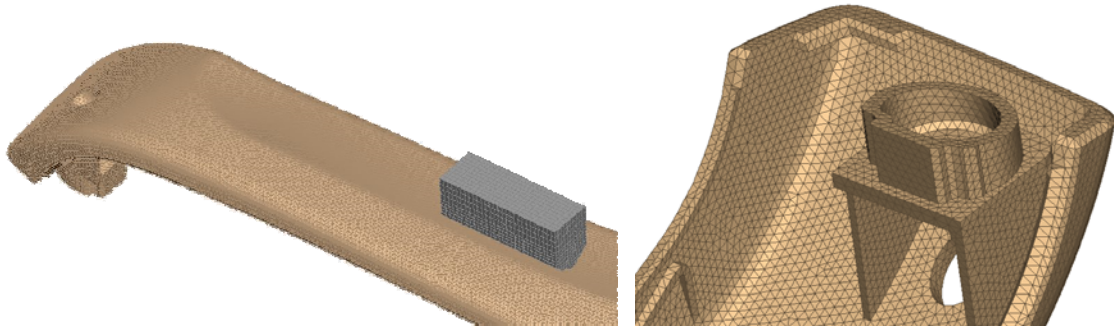


Figura 6.7. Modelo Tapa Asidero, elementos sólidos. Detalles de malla

Debe tenerse en cuenta que se han usado elementos 3D del tipo Tetra4, pirámide triangular de primer orden. Se remarca de nuevo que no permite establecer gradientes de deformación para puntos interiores del elemento por ser iso-deformacional (y consecuentemente iso-tensional). Se han garantizado 3 elementos a lo largo de los espesores principales, para obtener una buena captura de la respuesta a lo largo de éstos.

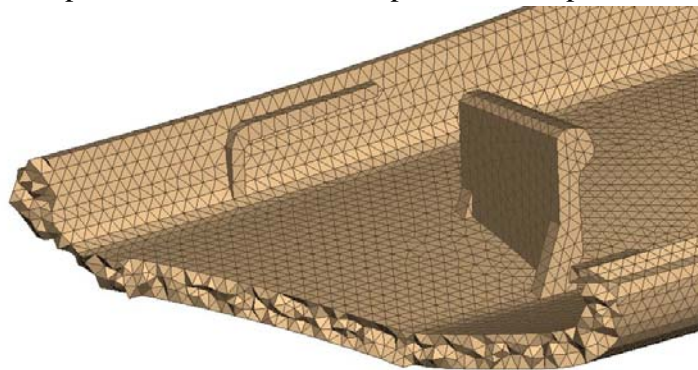


Figura 6.8. Detalle de la distribución de elementos en el espesor general de pieza

En concreto se ha utilizado el elemento sólido C3D4. Este elemento no permite la posibilidad de integración reducida (minimización de los puntos de Gauss) [1].

La siguiente tabla recoge los datos estadísticos del modelo. Tal como puede verse, el número de elementos asciende a unos 900 000, presentando alrededor de 600 000 ecuaciones en el sistema numérico de resolución. Esto representa unas 2.5 horas de análisis para un procesador Intel Core 1.7GHz, con 4GB RAM, tiempo considerado como correcto para poder realizar análisis de sensibilidad.

Se ha realizado un control de calidad de malla sobre el modelo, garantizando que los elementos que se encuentren fuera de los valores marcados por los ratios de calidad representen menos del 10% del total, y que estos elementos no se concentren en una determinada zona. Se ha exigido un valor del ratio Jacobiano superior a 0.2 [2].

Modelo MEF	Núm. Nodos	Núm. elementos	Núm. elementos sólidos	Núm. elementos contacto	Núm. de ecuaciones
Tapa Sólidos	197569	920287	920113	174	596259

Tabla 6.1. Estadístico de malla para el modelo Tapa Sólidos

Un total de 6143 elementos sobre 920 113 no cumplen rigurosamente los criterios establecidos. Este valor es inferior al 1%, por lo que la calidad obtenida es excelente.

6.3.3.2. Condiciones de contorno

Con el fin de ajustar al máximo la correlación sin introducir detalles que disparen el número de elementos (por ejemplo con la introducción de la estructura en el dominio, con malla sólida), se realiza una caracterización de la rigidez a flexión de cada zona de fijación, para contemplarlas en los modelos CAE.

Se ha utilizado un dinamómetro de la marca SAUTER, modelo TVP-L, con fondo de escala de 500N y carrera máxima de 70mm. Se han realizado 5 ensayos de carga vertical, para ambos puntos, obteniéndose unos valores de rigidez a flexión de $K_{FL1}=430$ N/mm y $K_{FL2}=105$ N/mm, promedio de los valores leídos en los primeros 150N.



Figura 6.9. Ensayo de caracterización de rigidez de la cartela a flexión. Punto 2

El gráfico siguiente muestra la respuesta media de los ensayos realizados sobre ambos puntos.

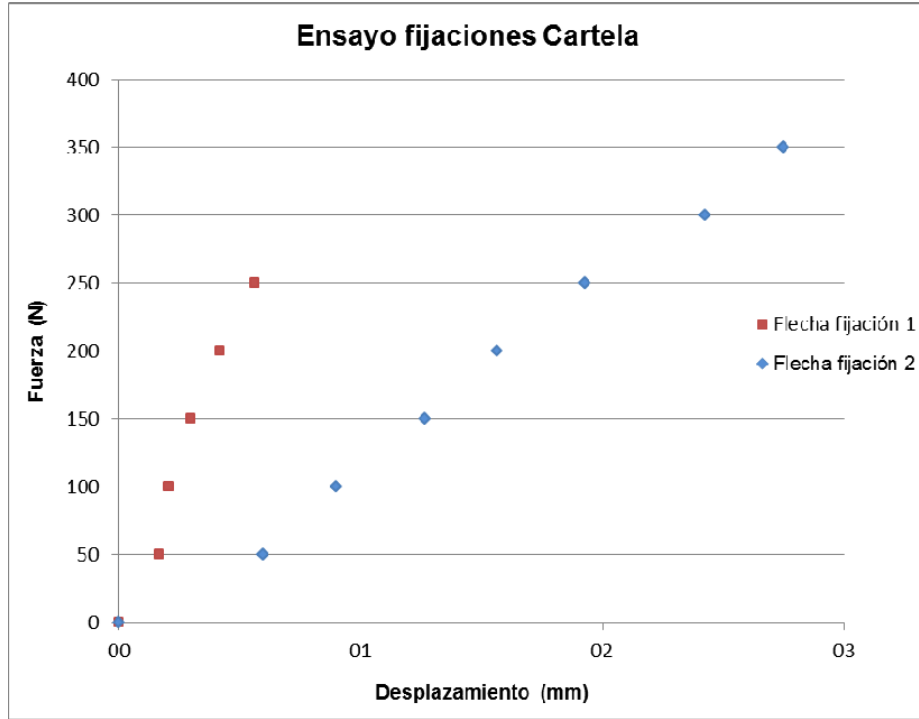


Figura 6.10. Ensayo de caracterización de rigidez de la cartela a flexión. Curvas promedio

Para la fijación 1 se han implementado condiciones de enlace radiales en los puntos de los orificios (restricción radial), respecto a sistemas de coordenadas locales. El apoyo de la pieza Tapa se realiza mediante 8 elementos tipo Spring, 4 a cada lado, habilitando la rigidez correspondiente en toda el área de apoyo. Finalmente, el contacto superior de la cabeza del tornillo, inicialmente contemplado, se ha eliminado mediante observación de la deformada. En los primeros análisis se muestra que los puntos de contacto de la Tapa en esta zona presentan un pequeño corrimiento descendente. Por otro lado se han despreciado las tensiones de montaje debidas al apriete del tornillo.

Se ha contemplado el área de interacción de la cabeza del tornillo para la fijación 2. Toda esta zona es solidaria al extremo de la cartela, por lo que presenta una rigidez vertical equivalente a la calculada mediante k_{FL2} . Los nodos emplazados en la superficie cilíndrica del orificio se encuentran restringidos versus un movimiento radial, respecto a un sistema de coordenadas local.

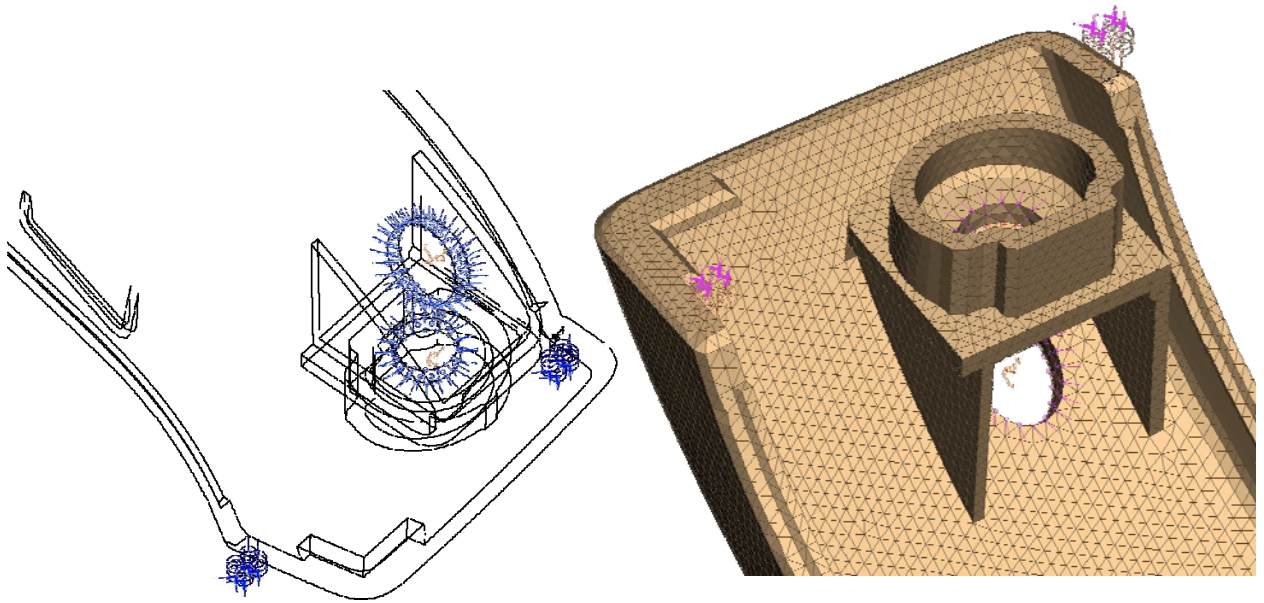


Figura 6.11. Condiciones de enlace para la fijación 1. Rigidez de base según k_{FL1}

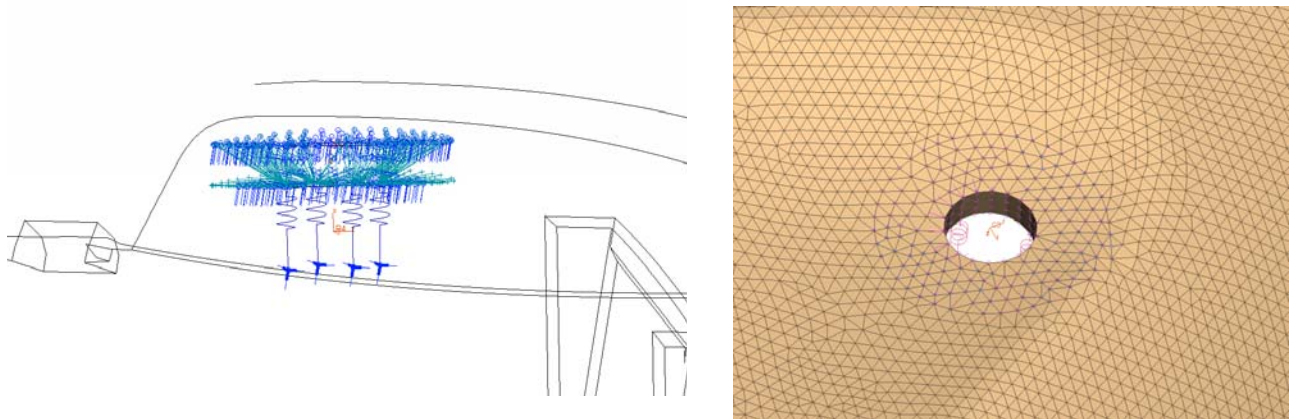


Figura 6.12. Condiciones de enlace para la fijación 2. Rigidez de base según k_{FL2}

6.3.3.3. Modelo sin ley de endurecimiento (Tapa Sólidos Pendientes Positivas)

Los resultados obtenidos del modelo sin ley de endurecimiento se muestran a continuación, modelo con tan solo la corrección a valores positivos de las pendientes.

6.3.3.3.1. Valor sollicitación

El gráfico siguiente muestra el valor de la deformación obtenida para este modelo versus la sollicitación aplicada.

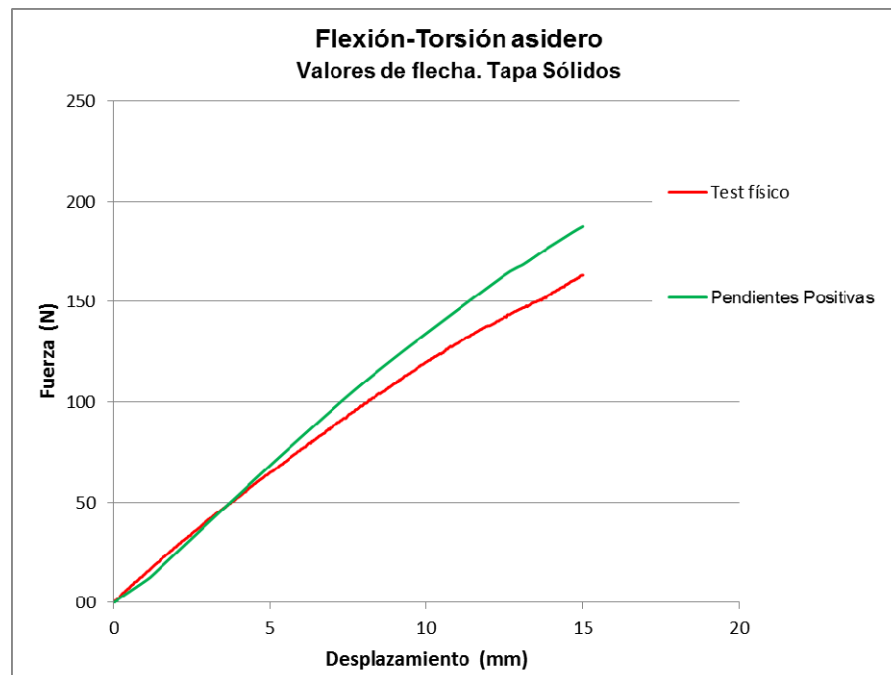


Figura 6.13. Curva fuerza aplicada Tapa Sólidos Pendientes Positivas vs curva test físico

6.3.3.3.2. Deformada

Se muestra el mapa de deformaciones en y. Puede apreciarse la asimetría de la deformación, debido a la torsión que aparece en combinación con la flexión.

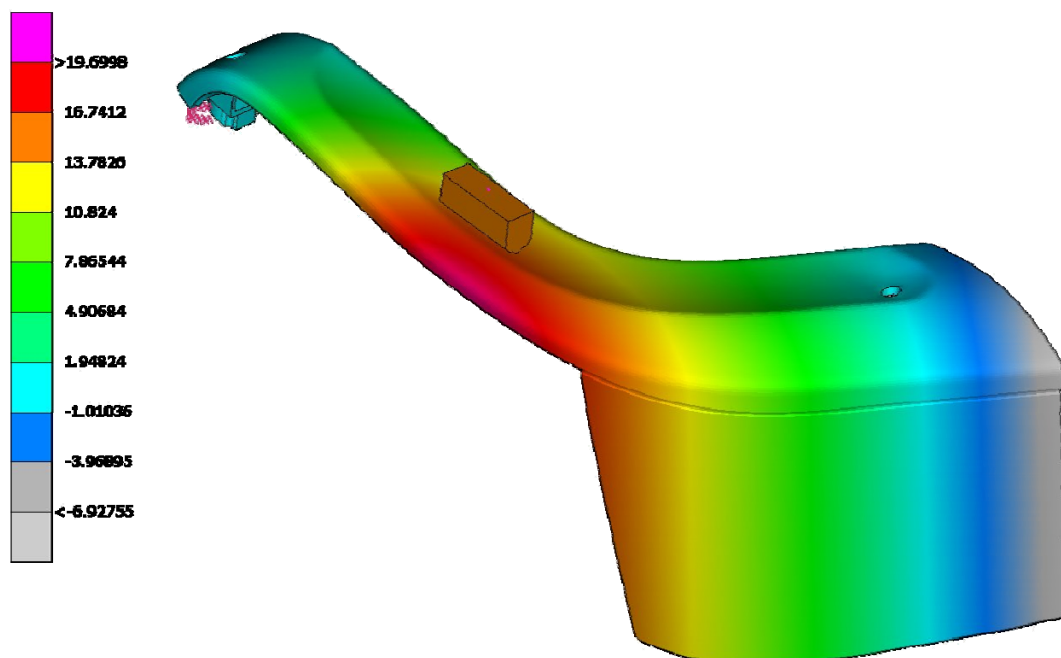


Figura 6.14. Mapa de corrimientos verticales en mm. Tapa Sólidos Pendientes Positivas

6.3.3.3. Diagrama de tensiones equivalentes elementales de Von Mises, σ_{VM}

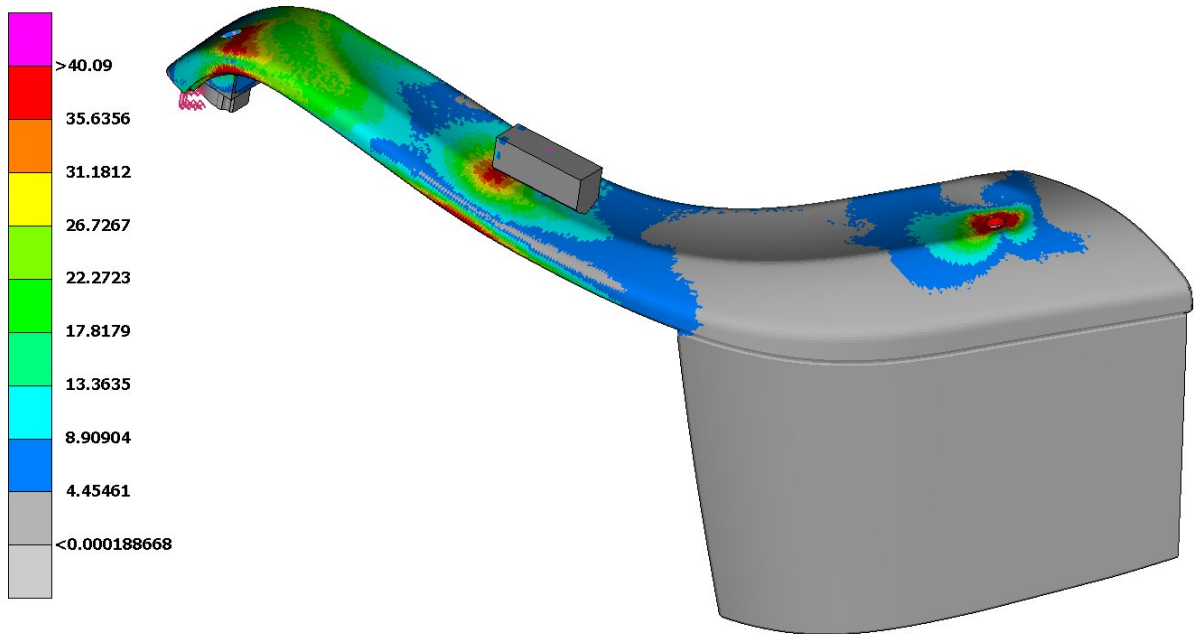


Figura 6.15. Tensiones elementales de Von Mises, MPa. Tapa Sólidos Pendientes Positivas

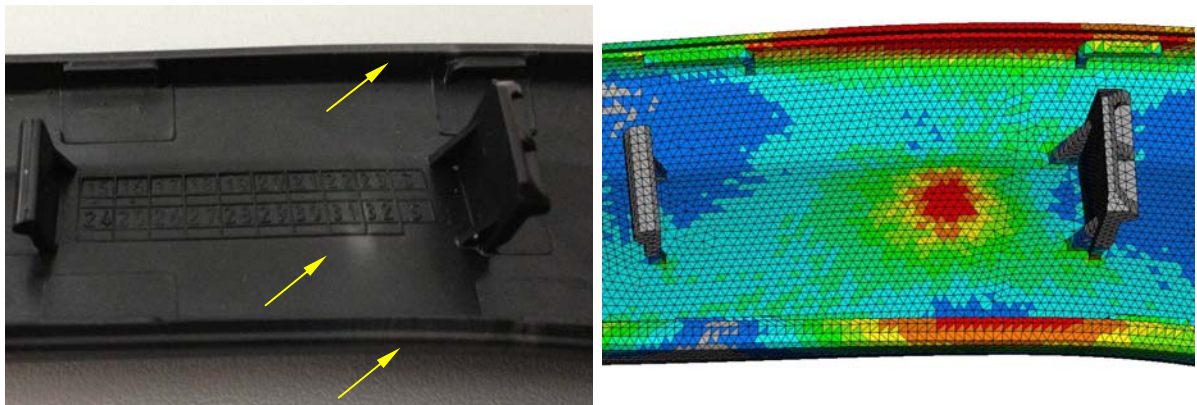


Figura 6.16. Detalle zona plastificación central y alas laterales (marcas transversales)

6.3.3.3.4. Diagrama de tensiones principales

Se muestran las tensiones principales máxima y mínima, para poder definir el carácter de los distintos puntos sometidos a flexión. La zona central presenta puntos con tensores de carácter 100% a compresión (fibra superior, círculos de Mohr situados en valores negativos) y puntos con comportamiento pleno a tracción (fibra inferior).

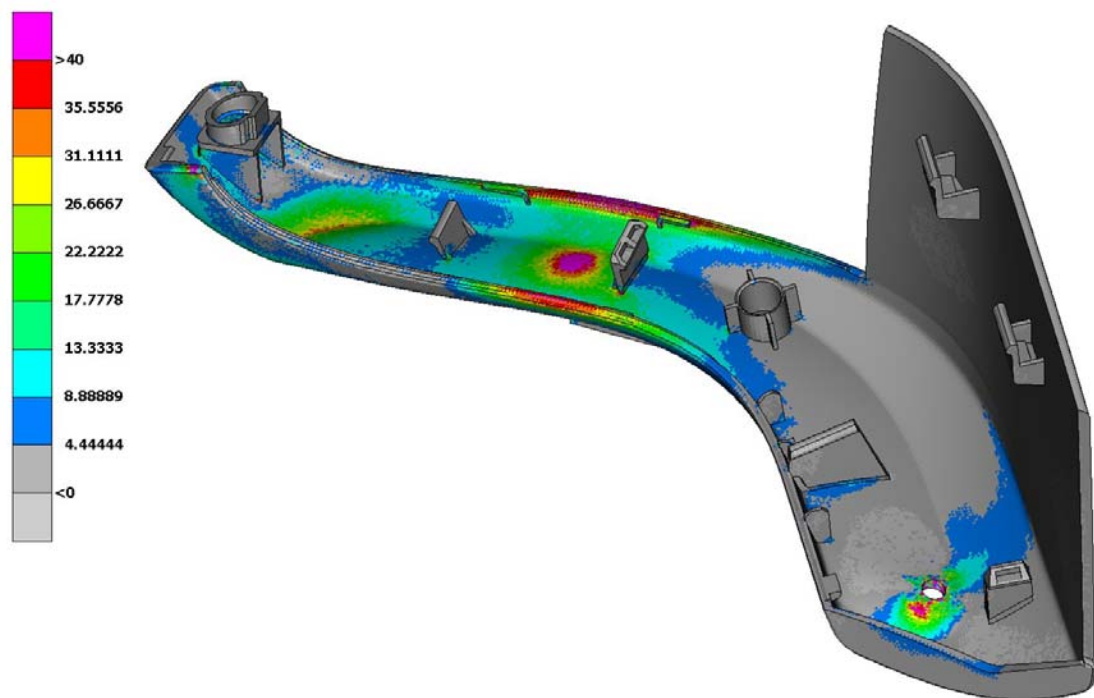


Figura 6.17. Diagrama de tensión principal máxima, en MPa, σ_I

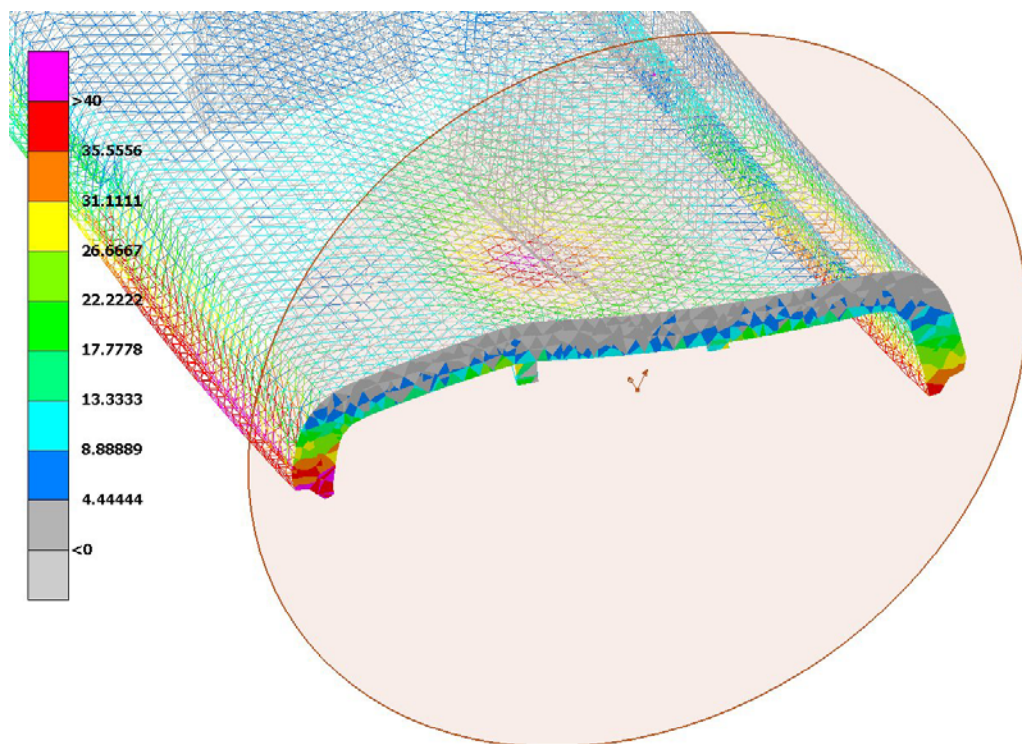


Figura 6.18. Tensión principal máxima, en MPa, σ_I Detalle en sección más solicitada

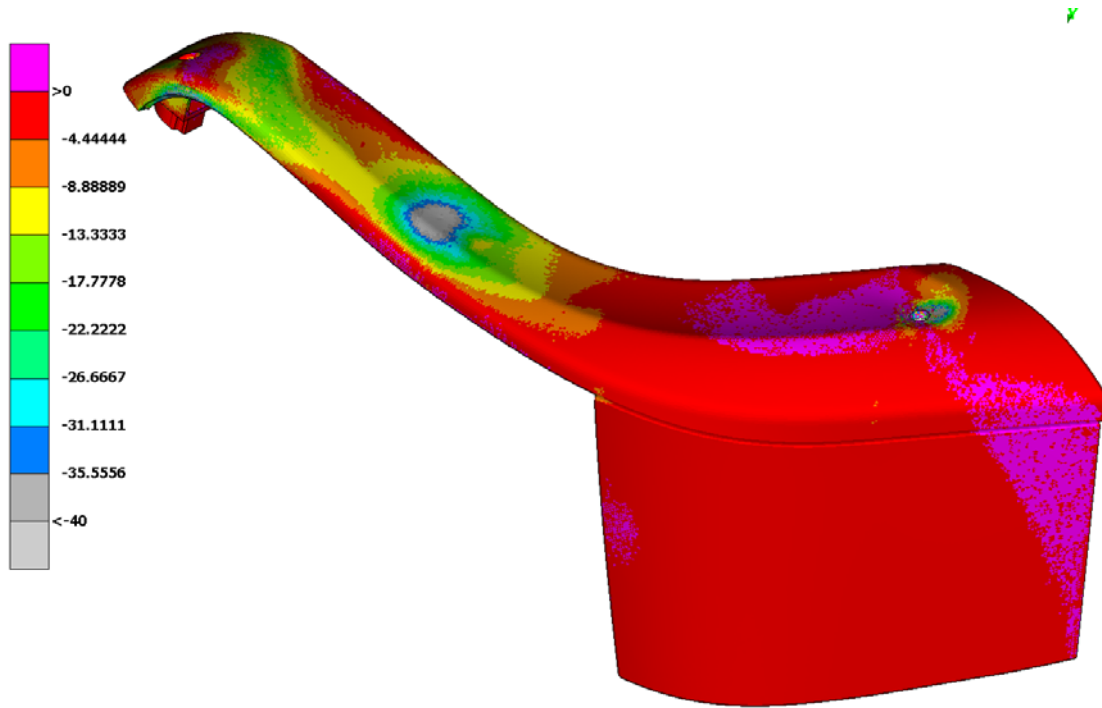


Figura 6.19. Diagrama de tensión principal mínima σ_{III} , en MPa

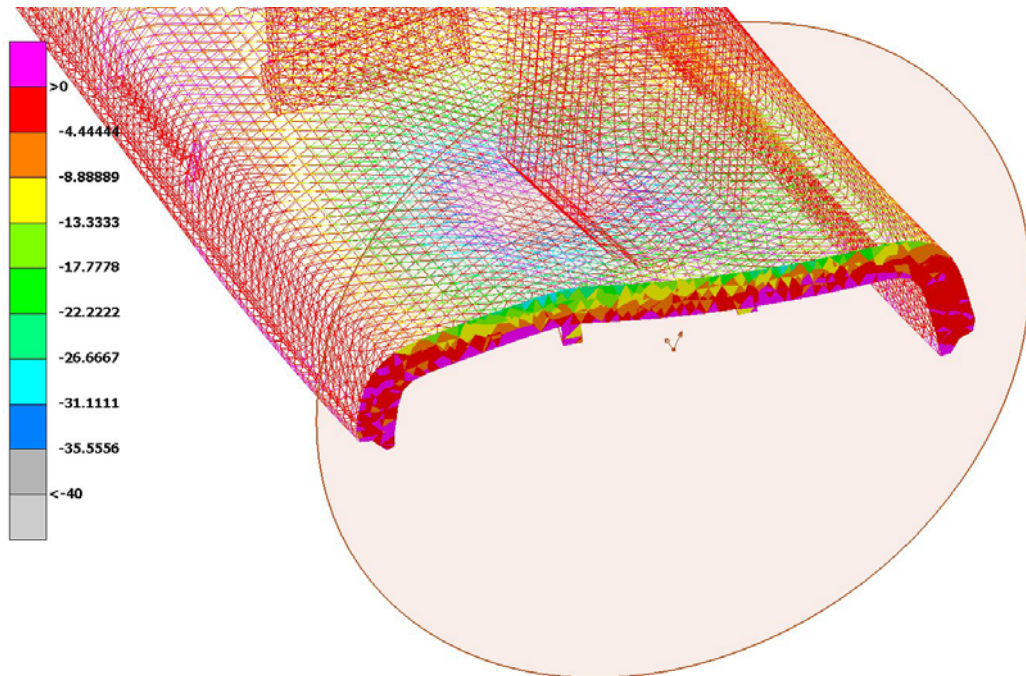


Figura 6.20. Tensión principal mínima σ_{III} , en MPa. Detalle en sección más solicitada

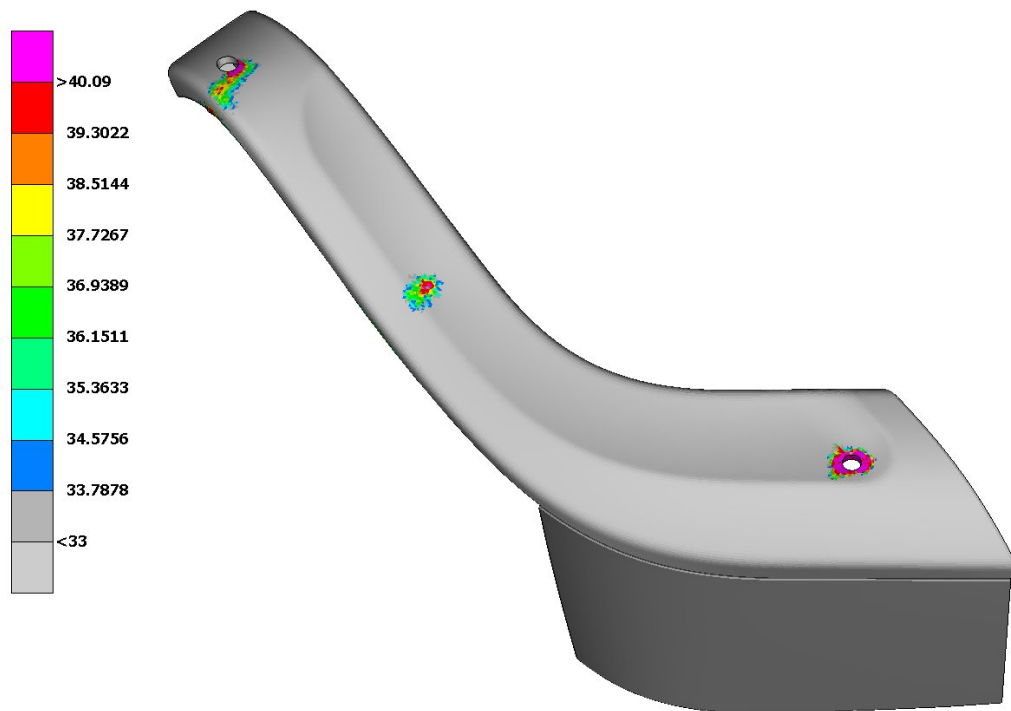


Figura 6.21. Tensiones de Von Mises, en MPa, zonas de plastificación. Vista superior

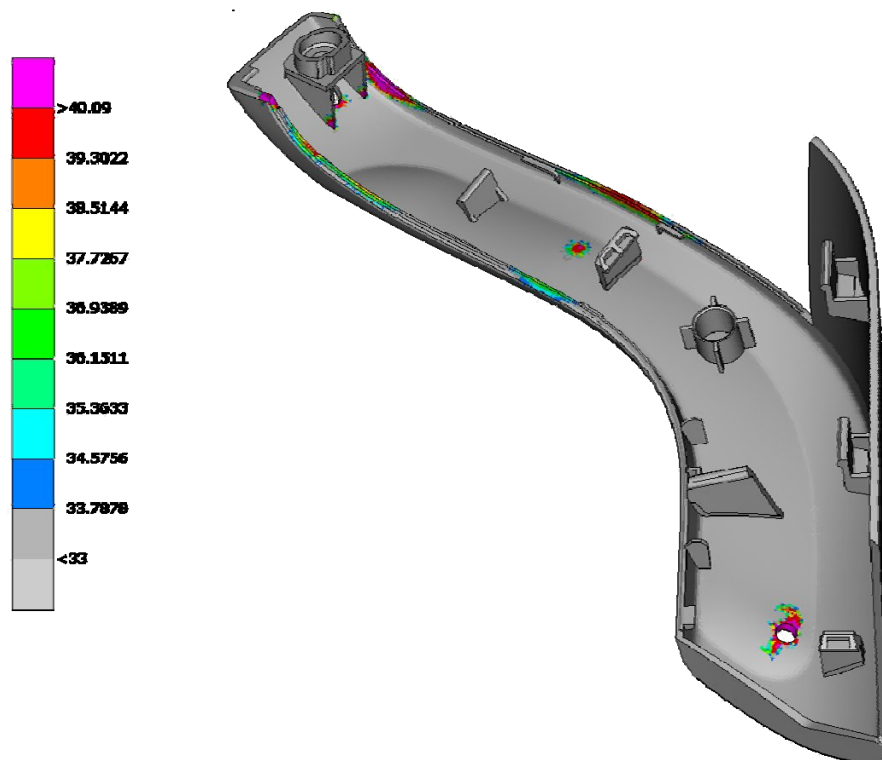


Figura 6.22. Tensiones de Von Mises, en MPa, zonas de plastificación. Vista inferior

Los mapas de tensiones y de deformaciones para los siguientes modelos (con elementos sólidos) son muy similares. Tan solo se destaca el parámetro de validación flecha en cada caso, para la comparativa, y dos mapas para el modelo Ideal Industria.

6.3.3.4. Modelos con leyes de endurecimiento

Los resultados de la flecha obtenida para los modelos Tapa Sólidos *Endurec1* y Tapa Sólidos *Endurec2* pueden verse en la Figura 6.25.

6.3.3.5. Modelos con leyes de fricción

Para los 3 casos de ley de Coulomb implementados, con correcciones a pendientes positivas, se obtienen los siguientes valores de máxima deformación (Tapa Sólidos Fricción 0.25, Tapa Sólidos Fricción 0.35 y Tapa Sólidos Fricción 0.5), Figura 6.25.

6.3.3.6. Modelos con contacto ley exponencial (Tapa Sólidos Soft)

Puede verse el valor de la flecha (Figura 6.25) y el tiempo computacional (Tabla 6.2).

Modelo MEF	Núm. de ecuaciones	Tiempo de cálculo
Tapa Sólidos Pendientes Positivas	596259	1h, 39 min
Tapa Sólidos Soft	596259	1h, 45 min

Tabla 6.2. Tiempos computacionales, modelo Soft versus modelo Pendientes Positivas

6.3.3.7. Modelo caracterización usual en industria (Tapa Sólidos Ideal Industria)

Este modelo corresponde a la implementación que suele realizarse en la industria, a partir de la curva ideal, falseando el límite de fluencia a valores bajos para poder contemplar con detalle la curva elastoplástica. A su vez determina un módulo elástico de cálculo más cercano al del origen.

No existe una regla definida para la selección del límite de fluencia. A partir de cada curva de material, se selecciona un valor concreto para cada caso.

Se ha recogido en las Figuras 6.23 y 6.24 la distribución de tensiones correspondientes a la etapa plástica, que en este caso corresponde a valores de tensión superiores a 25 MPa, límite de fluencia de cálculo seleccionado para el ABS.

Se muestra el resultado de la sollicitación obtenido en simulación versus la curva de referencia (test físico), conjuntamente con las otras curvas (Figura 6.25).

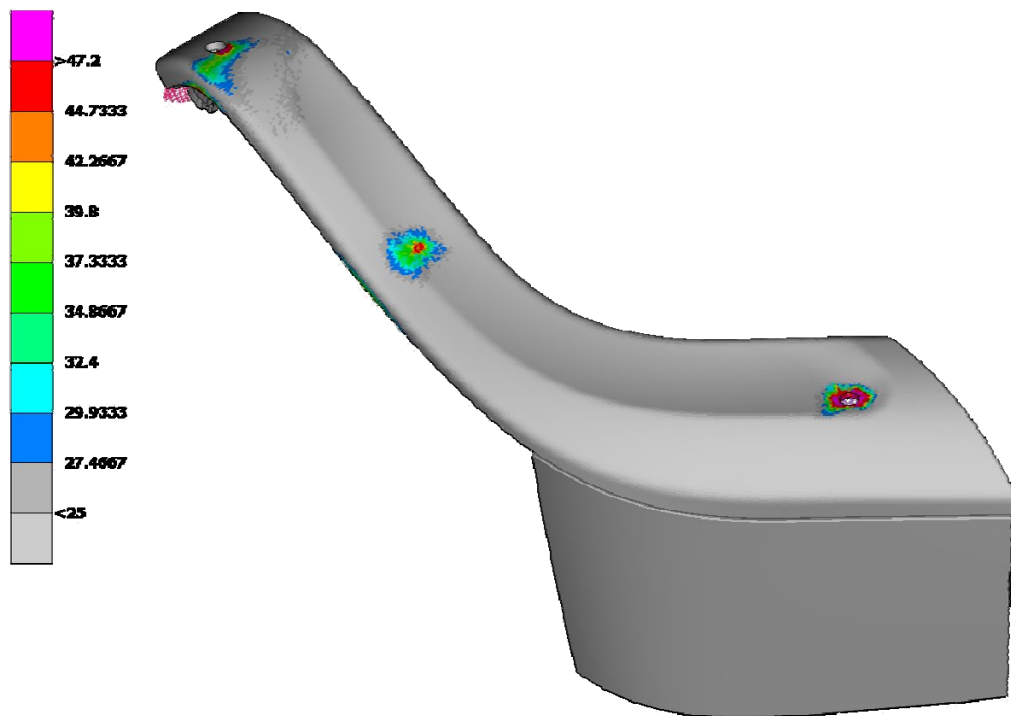


Figura 6.23. Tensiones de Von Mises (plastificación), MPa. Vista superior. Modelo Ideal Industria

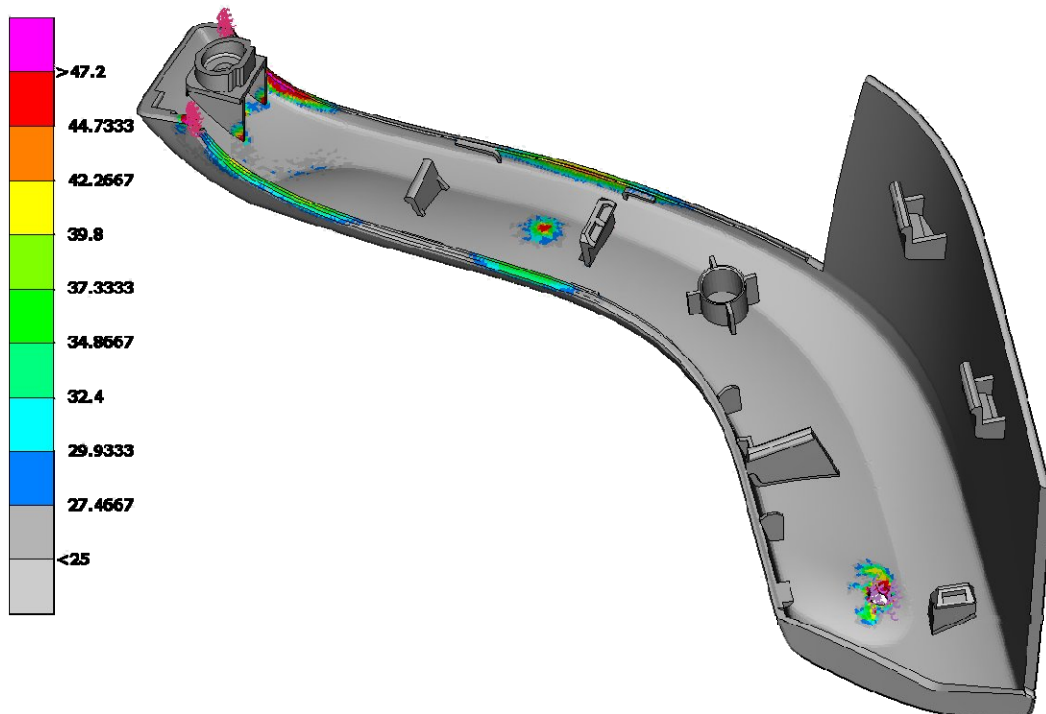


Figura 6.24. Tensiones de Von Mises (plastificación), MPa. Vista inferior. Modelo Ideal Industria

6.3.3.8. Valor sollicitación modelos Tapa Sólidos

Se agrupan las curvas solución de todos los modelos CAE con elementos sólidos, para una mejor comparativa.

En el caso de las curvas correspondiente a la curva Contacto soft (----), ésta se encuentra superpuesta con la Pendientes Positivas (—).

Por lo que se refiere a las curvas con leyes de endurecimiento Endurec1 (—) y Endurec2 (—), se posicionan encima de la Pendientes Positivas (—), con valores ligeramente superiores.

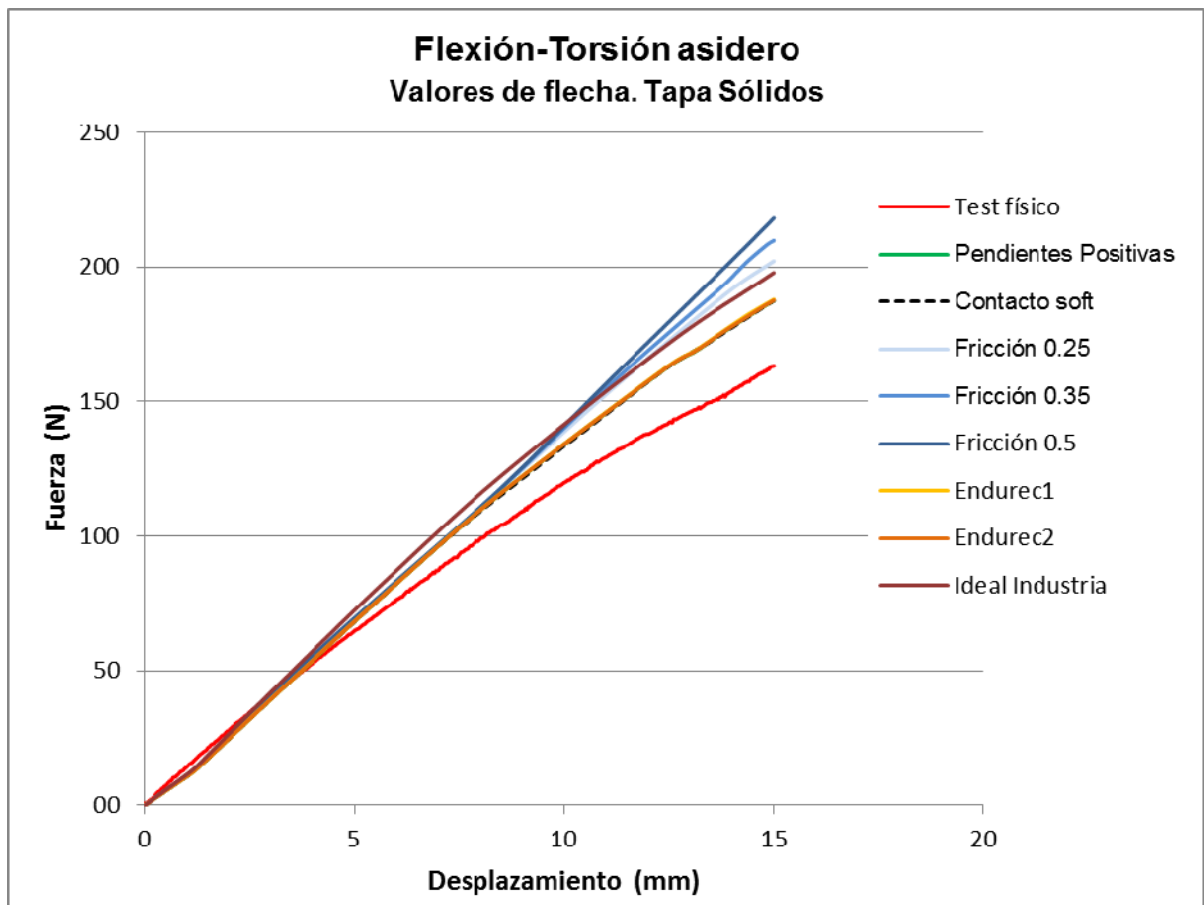


Figura 6.25. Curva Fuerza-corrimiento en y, varios modelos, vs curva test físico

6.3.4. MODELO CON ELEMENTOS TIPO PLACA (TAPA PLACAS)

6.3.4.1. Definición de malla. Tiempo de cálculo

Siguiendo los criterios de calidad para elementos tipo placa habituales establecidos por los fabricantes de automóviles, se obtiene el modelo mostrado en la siguiente imagen.

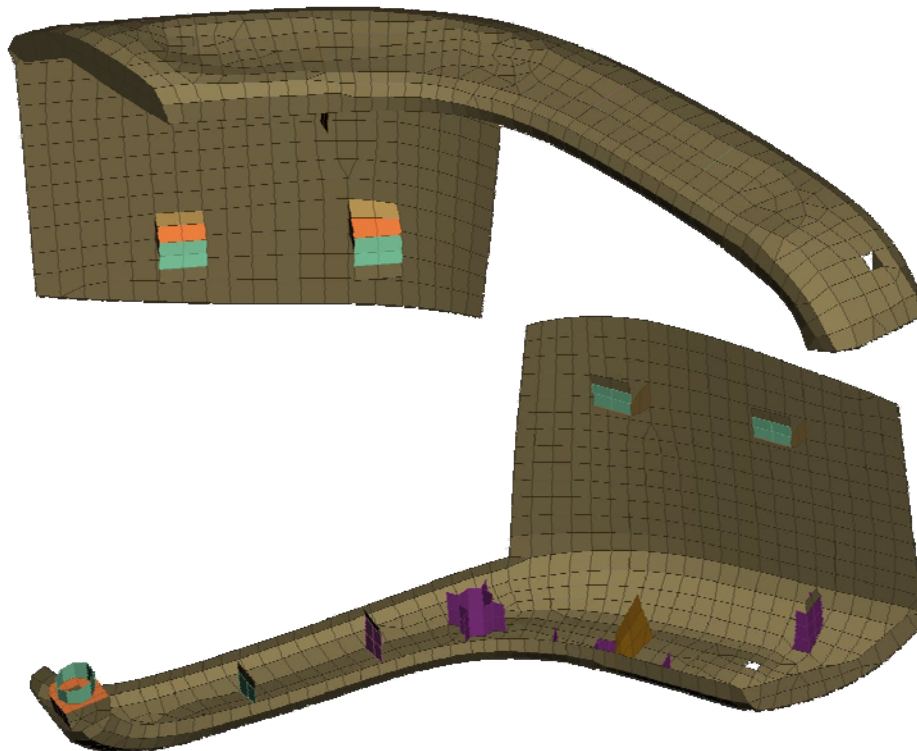


Figura 6.26. Modelo Tapa Placas. Densidad de malla. Mapa de colores según espesor

La cantidad de elementos viene acotada por la filosofía de modelo único, para lograr ensamblajes completos con un número controlado de elementos, y por la longitud de arista mínima de elemento, que gobierna el incremento de avance en el método computacional explícito, para dinámica estructural.

Tal como puede apreciarse, el modelo queda definido con unos 1900 elementos, condicionados por el cumplimiento de unos valores de ratios mostrados en la Tabla 6.3 [2].

En este caso, un 7% de elementos no cumplen los criterios, por lo que la calidad de malla se considera buena.

El tipo de elemento utilizado es el de placa tridimensional S4, de integración completa, aceptándose los elementos S3 triangulares como degeneración del anterior [1]. Se exige un control de elementos S3, que no debe superar el 10% aproximadamente, según distintos criterios de los fabricantes de automoción. Se valida también la no concentración de éstos en áreas de interés.

Criteria	Calculation	Failed
✓ aspect ratio	PATRAN √	3.
✓ skewness	PATRAN √	45.
✓ warping	PATRAN √	10.
✓ taper	PATRAN √	0.6
crash time step	PAM-CRASH √	1.E-6
✓ jacobian	ANSA √	0.7
✓ min length		4.
✓ max length		12.
✓ min angle quads	IDEAS √	46.
✓ max angle quads	IDEAS √	134.
✓ min angle trias	IDEAS √	31.
✓ max angle trias	IDEAS √	119.
stretch		0.5
triangles %		20.

Tabla 6.3. Ratios de calidad de malla impuestos en el software ANSA, modelo Tapa Placas

Modelo MEF	Núm. Nodos	Núm. elementos	Núm. elementos sólidos	Núm. elementos contacto	Núm. de ecuaciones	Tiempo de cálculo
Tapa Placas	2323	2105	1931	174	11886	24 s

Tabla 6.4. Modelo Tapa Placas. Estadístico del mallado. Tiempo de cálculo

6.3.4.2. Condiciones de contorno

Se implementan las mismas constricciones que para los modelos con elementos sólidos.

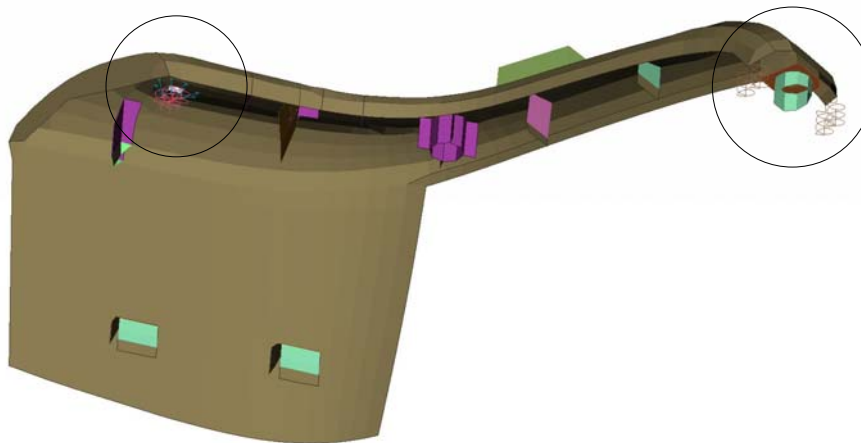


Figura 6.27. Restricciones, modelo Tapa Placas

6.3.4.3. Indentador

Se establecen elementos de contacto entre las superficies de interacción del indentador y de la Tapa, de la misma forma que en los modelos con elementos sólidos anteriormente presentados. Sin embargo, en este caso, es necesario especificar correctamente el cierre del elemento de contacto en la posición física real de la piel exterior de la Tapa. Debe recordarse que la superficie mallada corresponde a la superficie intermedia y no la exterior de interacción.

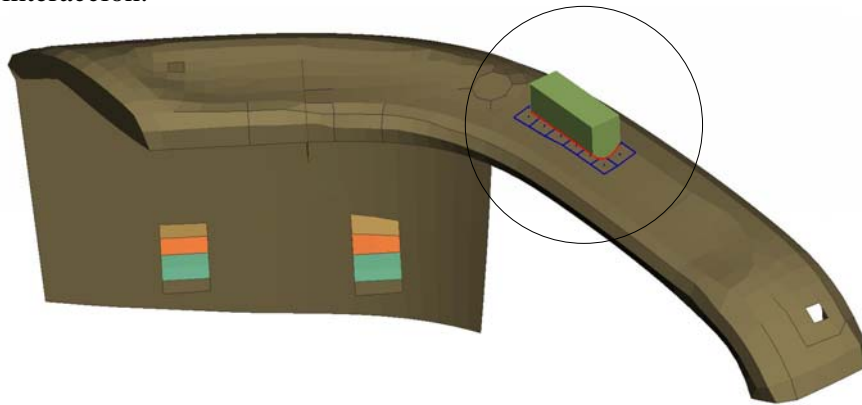


Figura 6.28. Elementos de contacto, zona interacción con el indentador, modelo Tapa Placas

6.3.4.4. Valor solicitación

El resultado de la solicitación aplicada para una flecha de 15 mm es de 139N.

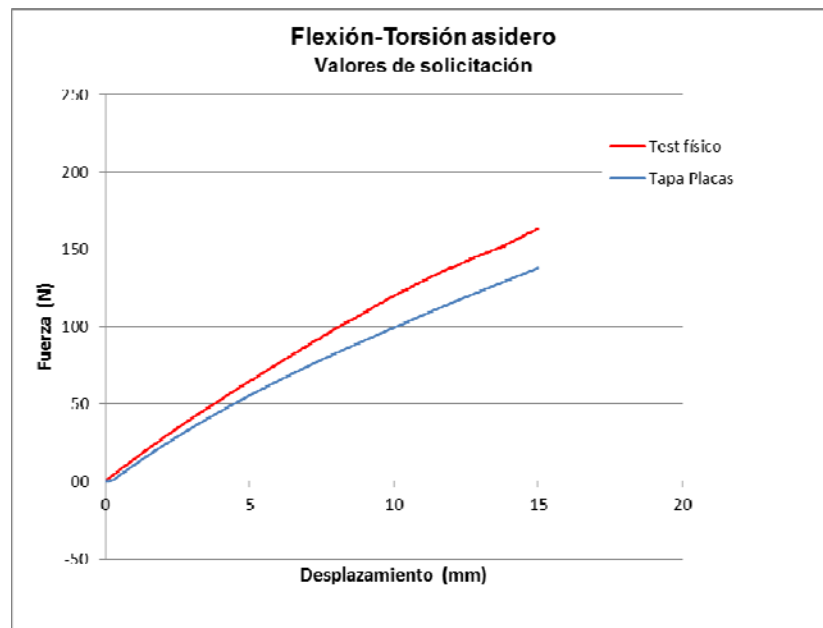


Figura 6.29. Curva Fuerza-corrimento en y, Tapa Placas vs curva test físico

6.3.4.5. Deformada. Mapa de corrimientos y

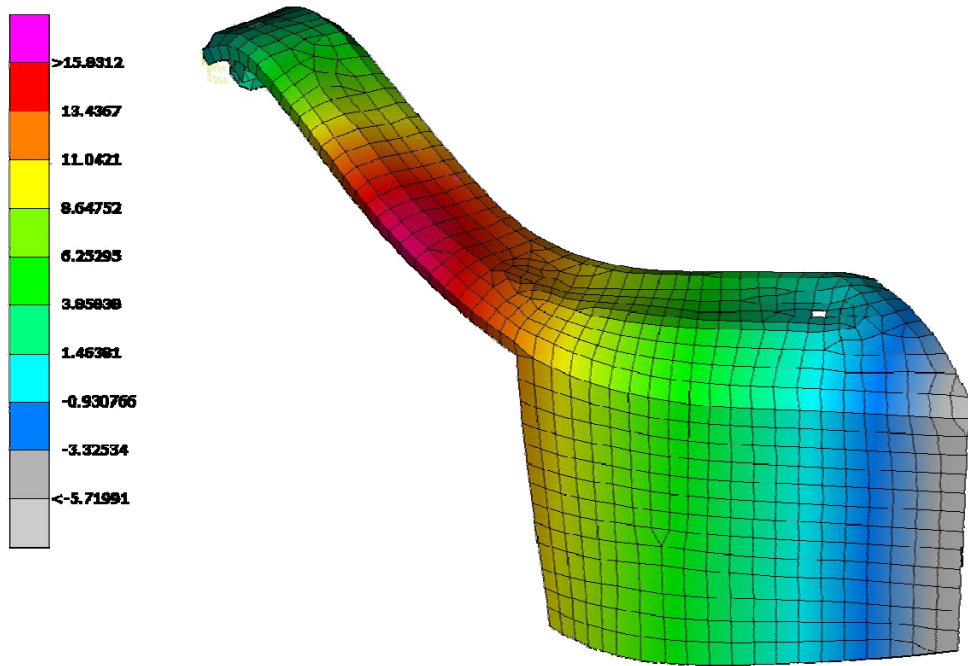


Figura 6.30. Diagrama de deformaciones verticales, en mm. Modelo Tapa Placas

6.3.4.6. Tensiones equivalentes de Von Mises

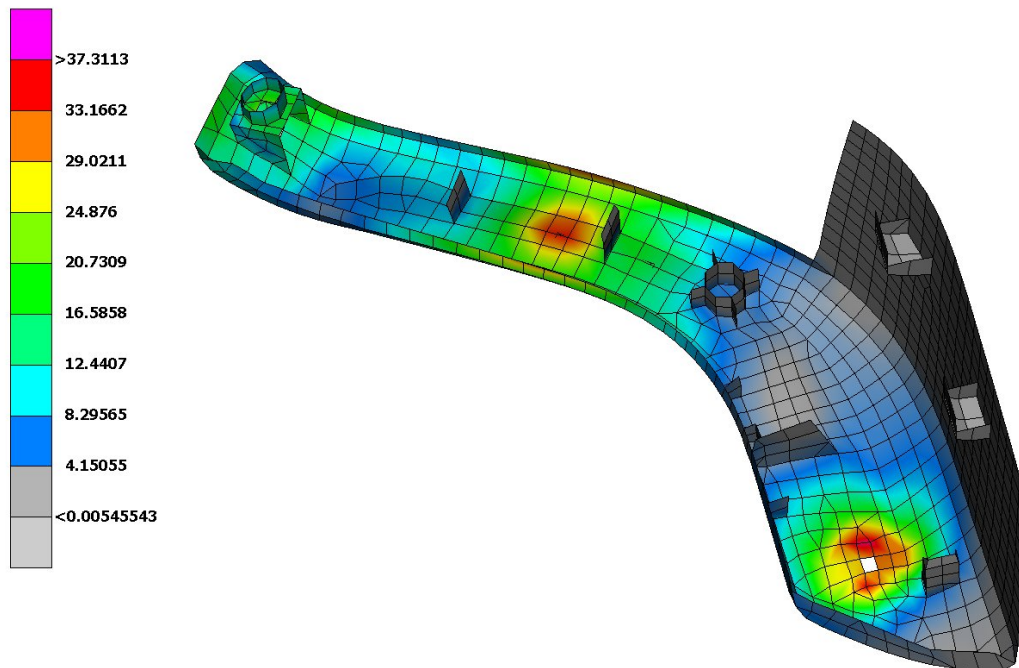


Figura 6.31. Diagrama de tensiones nodales equivalentes de Von Mises, en MPa. Tapa Placas

6.3.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.3.5.1. Modelos Tapa Sólidos

Para el caso de las bases de datos Tapa Sólidos, este tipo de modelo 3D presenta mayor rigidez que el comportamiento real del asidero, cuando se usa el modelo constitutivo de endurecimiento isotrópico de Von Mises.

En la metodología se introduce la selección de una ley de endurecimiento más allá de la tensión máxima, adecuada para cada material. Para el material ABS utilizado en este ejercicio híbrido test-simulación, la ley *Endurec2* es la que presenta resultados mejores: desviación de la flecha en un 15% respecto al valor del test físico. Se selecciona el uso de la ley de *Endurec2* para esta familia ABS. De la misma forma para la familia de los PPT se escoge la misma ley, en base a la comparativa de las curvas mostradas en las figuras 5.55 y 5.56; curva de endurecimiento versus curva recortada media verdadera.

Por lo que se refiere a la fricción, el uso de un valor genérico de coeficiente provoca el aumento de rigidez del dominio de estudio, alejando la solución del valor del test físico (0.25 con un 24%, 0.35 con un 28% y 0.5 con un aproximadamente 37%). En el caso de simulaciones estructurales cuasi-estáticas, este coeficiente combinado con un modelo 3D no resulta interesante, pues no se ha detectado mejoras en resultados, en convergencia o en tiempos computacionales. Esto no es extrapolable a otras situaciones estructurales, donde un coeficiente de fricción puede estabilizar (o desestabilizar) una problemática en dinámica, por ejemplo. En consecuencia, este parámetro no se introduce en la metodología para simulación cuasi-estática.

La implementación de la ley exponencial en los elementos de contacto no ha mejorado la convergencia, penalizando ligeramente el tiempo computacional. Esto es debido a que la definición del modelo utilizado con elementos sólidos es muy buena, por lo que los elementos de contacto no han presentado ningún problema a lo largo de los análisis a nivel local. Sin embargo, en otras situaciones, el uso de esta ley puede ser beneficioso, lográndose estabilizaciones de cálculo y mejorando los tiempos computacionales. En relación a este resultado, no se introduce como regla fija de uso en la metodología, dejando su posibilidad de utilización en aquellos casos de problemáticas computacionales.

Finalmente, para la caracterización ideal que se utiliza en la industria, se obtiene un valor de sollicitación aún mayor que el obtenido mediante la presente metodología (Tapa Sólidos *Endurec2*).

En referencia a la distribución de tensiones, comentar que el modelo Tapa Sólidos Ideal Industria presenta localmente una distribución de deformaciones plásticas más extendida, fruto del error cometido cuando se falsea el límite para seguir el trazo de la curva.

Esta correlación valida la presente metodología como mejora del método usualmente utilizado en industria, tanto por lo que se refiere al campo resistencial como el deformacional.

6.3.5.2. Modelos Tapa Placas

Este modelo presenta menor rigidez que el test físico, por lo que imponiendo el valor de 15 mm como deformación vertical, la fuerza necesaria es significativamente inferior a los 163N del test.

En comparación con el modelo Tapa Sólidos *Endurec2*, la desviación respecto al valor objetivo (test físico) es equivalente, pero por debajo (-15% de flecha). Sin embargo, es importante remarcar que este valor obtenido no es tan desfavorable debido a que los errores debidos a la modelización de placa se contrarrestan con los que se obtienen debido al uso del modelo constitutivo de Von Mises.

Finalmente notar el tiempo consumido, 24 segundos, versus la hora y 45 minutos aproximadamente para los modelos con elementos sólidos.

6.4. USO DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN (ETAPA 1)

Una vez evaluado los parámetros restantes, se está en disposición de listar las acciones para llevar a cabo la metodología de caracterización cuasi-estática en uso habitual, correspondiente a la etapa 1.

1. Selección del modelo constitutivo elastoplástico con endurecimiento isotrópico de Von Mises. Regla de endurecimiento isotrópica y la asociada como regla de flujo.
2. Fijación de los parámetros Temperatura y Velocidad de deformación: temperatura

ambiente y baja velocidad (1 mm/min o 5 mm/min).

3. Uso de extensómetro de clip en máquina universal, si es necesario obtener las curvas ideales de ingeniería de los materiales.

4. Definición del ensayo a tracción sobre probeta en máquina universal, si se requiere su uso.

5. Aplicación del Factor de Escala Máster sobre la curva ideal de ingeniería, $FE_{Máster}$, para cada material,

6. Determinación del Límite de Fluencia de Cálculo σ_{yC} mediante el Factor Límite de Fluencia, F_{σ} .

7. Corrección a valores verdaderos más allá del Límite de Fluencia de Cálculo.

8. Corrección de la curva verdadera más allá del punto máximo, según ley adecuada para la familia de materiales que se contempla. En el caso del ABS y del PPT16 usar la ley Endurec2.

9. Selección del tipo de elemento del modelo CAE, según escala y dominio.

10. Selección de elementos sólidos, para simulación de detalle. Implementar elementos tipo Hexaédrico, cuando sea posible, de primer orden. En caso de tener que usar mallado automático y no muy fino, implementar segundo orden (TETRA10, pirámide triangular con nodos intermedios en aristas). En el caso de uso de TETRA 4, asegurar un tamaño de arista extremadamente pequeño. Selección de elementos tipo placa para simulaciones de escala global.

11. Introducción optativa de un coeficiente genérico de fricción 0.3 en aquellos casos donde pueda ayudar a la convergencia numérica de resolución.

12. Introducción optativa de una ley de rigidez en los elementos de contacto, en aquellos casos de dificultades de convergencia numérica de resolución.

6.5. BIBLIOGRAFIA

- [1] “ABAQUS Analysis User’s Manual, release 6.8. Volumen IV: Elements.” Abaqus Inc., USA, 2008.
- [2] “ANSA v.13.0.2 User’s Guide.” BETA CAE Systems S.A., Greece, 2009.

CAPÍTULO 7

VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN CUASI-ESTÁTICA

A diferencia del ejercicio híbrido realizado en el capítulo anterior, que ha servido para validar la metodología, en este capítulo se aplica el uso de la propuesta sobre un ejemplo real de industria, para una verificación de ésta. El nivel de complejidad del presente modelo, que incluye varias piezas con uniones de difícil modelización a escala global, con asentamientos de estos componentes en los primeros instantes del ensayo, tan solo permite usar este modelo como herramienta de verificación en uso habitual. Sobre el Módulo Panel Puerta se realizan las simulaciones estáticas de rigidez en distintos puntos, aplicando la metodología presentada y también con la estrategia de caracterización habitual en industrial. Se comparan resultados con los valores obtenidos experimentalmente.

7.1. DESCRIPCIÓN DEL CONJUNTO MÓDULO PANEL PUERTA

El conjunto utilizado para la verificación corresponde a un Módulo Panel Puerta (MPP) de un automóvil, ubicado en la posición delantera de un vehículo de 3 puertas, en lado

conductor. Este módulo se monta en la estructura interior metálica de acero de la puerta mediante clips situados perimetralmente.

En las Figuras 7.2 y 7.3 pueden verse los clips de montaje y la estructura metálica sobre la que va ensamblada el conjunto de estudio [1].

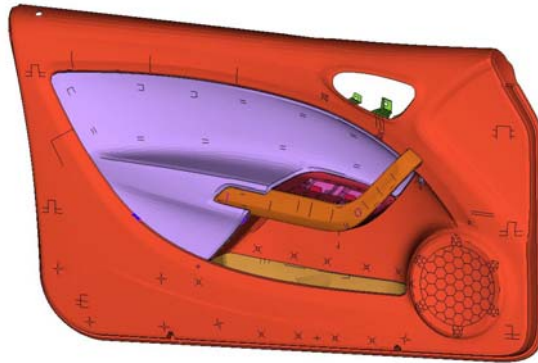
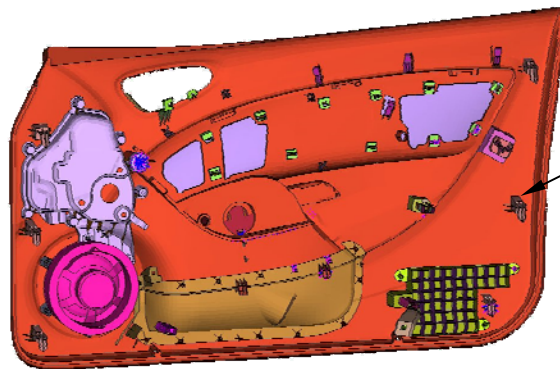


Figura 7.1. Vista anterior Módulo Panel Puerta, modelo CAE



Clips de fijación
perimetral

Figura 7.2. Vista posterior Módulo Panel Puerta, modelo CAE

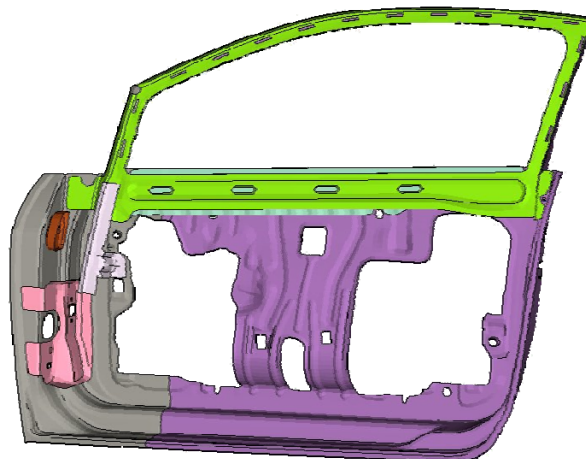


Figura 7.3. Vista posterior de la estructura metálica, soporte estructural del MPP, modelo CAE

7.1.1. COMPONENTES DEL CONJUNTO MPP

El componente principal del Módulo Puerta es el Panel, que es la pieza de mayor envergadura y sobre el que van ensamblados distintos elementos. El panel lleva anclado el motor elevallunas (recubierto por la Tapa motor), el Altavoz, el Inserto, el Fondo bolsa y el conjunto apoyabrazos formado por la Tapa Asidero y un refuerzo estructural (Armazón Estructural). La Tapa Asidero es parecida a la utilizada en el capítulo anterior, pero en este caso corresponde a un panel anterior. Puede verse también una pieza (*Padding*) cuya funcionalidad es exclusiva frente a impacto lateral sobre vehículo (*side crash*).

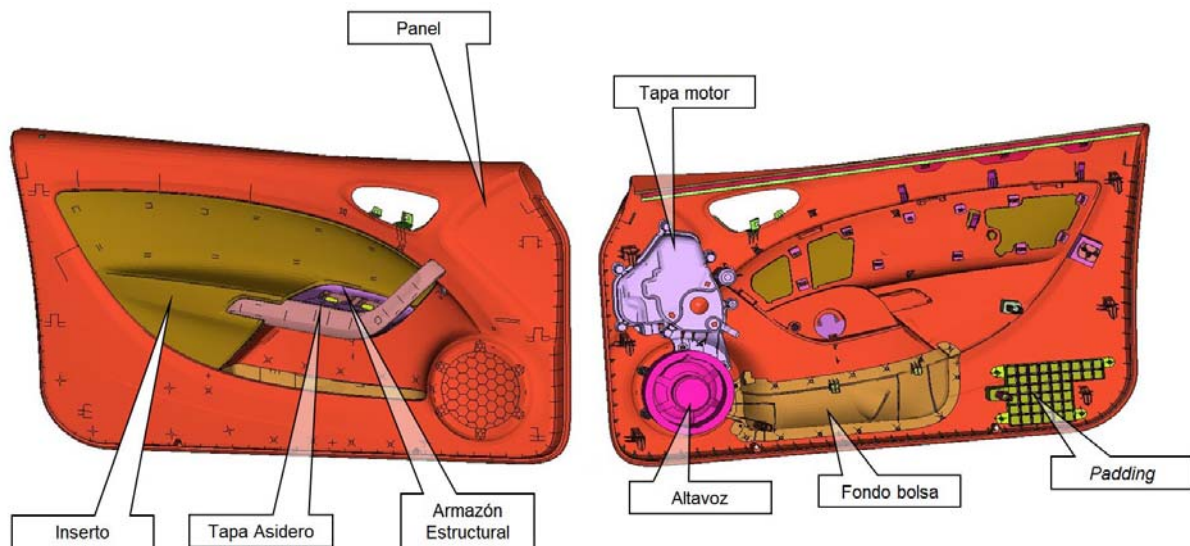


Figura 7.4. Vista anterior y posterior Módulo Panel Puerta. Componentes

7.1.2. RELACIÓN DE MATERIALES. ESPESORES. MALLA

Las distintas piezas están fabricadas con 3 de los materiales de estudio: PPT16b, PPT30 y ABS. Un cuarto material participa en las simulaciones (acero).

Puede apreciarse que la pieza Inserto no es exactamente la misma que la utilizada para la extracción de muestras. En este caso, para este panel, se fabrica con PPT16b.

Los espesores que presentan las distintas piezas se esquematizan en la siguiente imagen. Para simplificar el gráfico tan solo se detallan los espesores generales, teniendo en cuenta que los nervios de los distintos componentes tendrán valores inferiores. El modelo CAE contempla todos estos detalles.

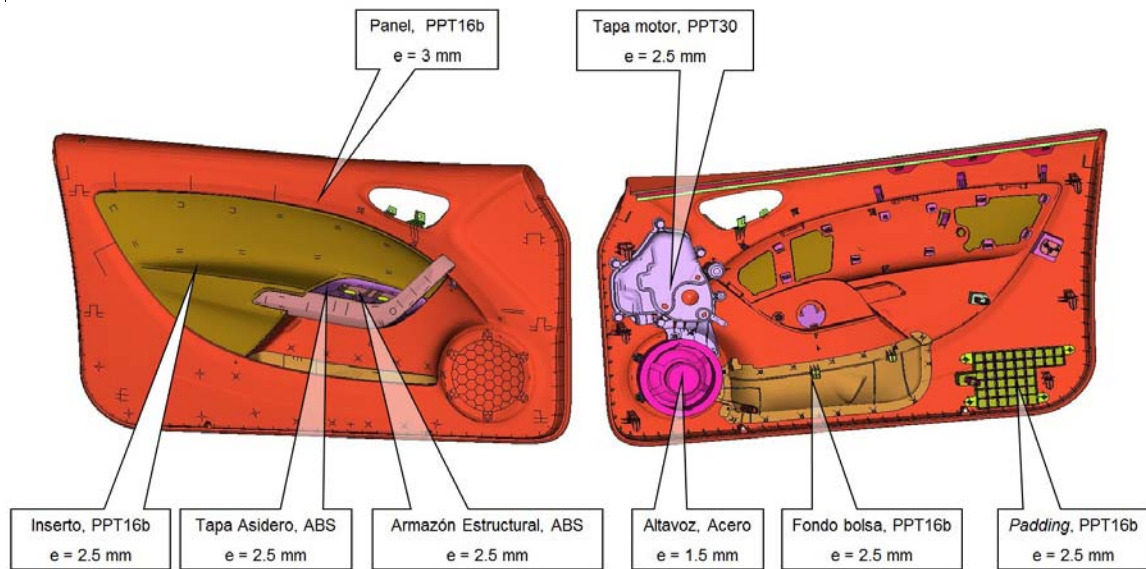


Figura 7.5. Vista anterior y posterior MPP. Espesores y asignación de materiales

Se ha realizado el mallado de todas la piezas mediante elementos tipo placa, respetando los criterios de la Tabla 6.3, con un valor de número de elementos no cumpliendo algunos de los ratios inferior al 10%. En este caso la escala corresponde a un enfoque global.

Las curvas de cálculos para los 3 materiales se han presentado en las figuras 5.55, 5.56 y 5.57. La ley de endurecimiento corresponde a *Endurec2* en los 3 casos. Para el acero, se ha considerado la curva de la siguiente figura.

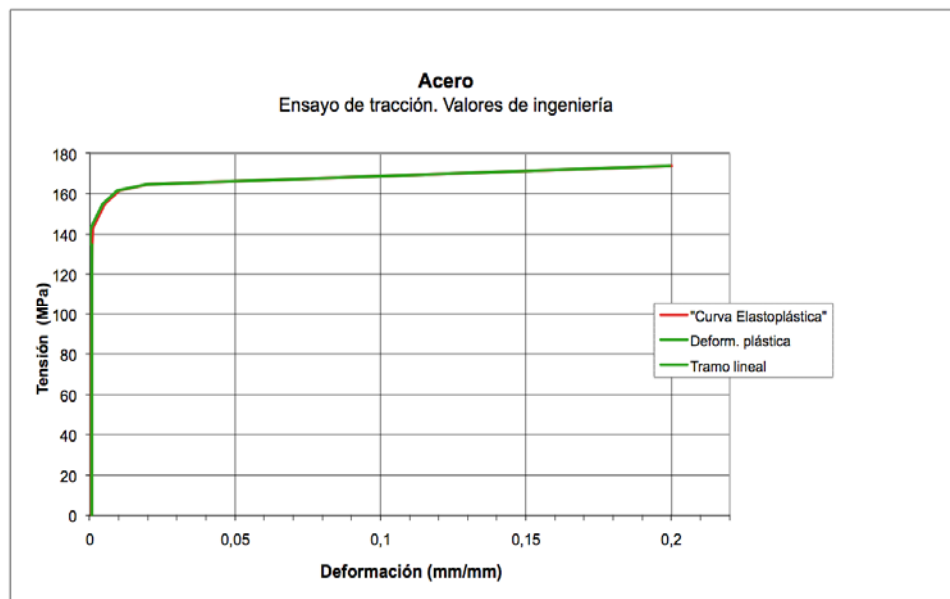


Figura 7.6. Curva de cálculo, material acero

7.1.3. CONDICIONES DE ENLACE DEL MODELO

Se han modelizado las siguientes constricciones de dominio, que respetan los enlaces del Módulo Panel Puerta con el ensamblaje en vehículo. Estas condiciones de enlace son las mismas que las que presenta el módulo estructural de ensayo físico, estructura realizada con perfiles de aluminio de sección optimizada.

La definición de esta modelización corresponde a la habitual en ejercicio diario en industria, para modelos de escala global.

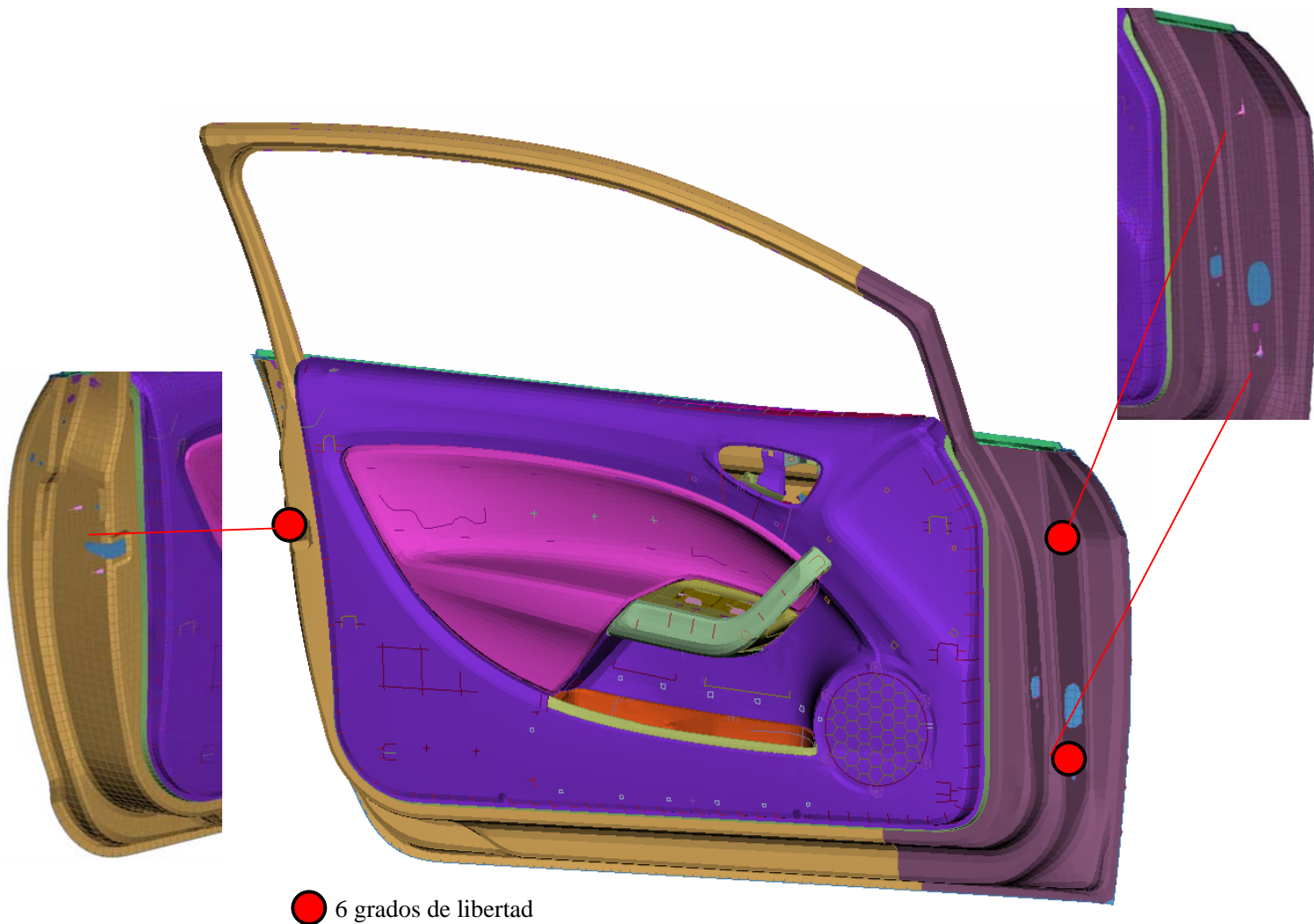


Figura 7.7. Restricciones del dominio de estudio

7.2. REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES. CUADERNO DE CARGAS

El conjunto MPP está sometido a exigencias estáticas y dinámicas, por lo que el cuaderno de cargas experimental lo forman varios grupos de ensayos físicos. A partir del cuaderno de cargas, que forma parte del pliego de condiciones que recibe el proveedor, se extraen las simulaciones que deben realizarse, intentando que cada una de ellas se acerque al máximo al test físico, que a su vez es una simplificación del comportamiento real. En algunos casos se realizan simulaciones reducidas o simplificadas (debido a la dificultad o imposibilidad de abordar el test como tal). En estos casos, si se supera la simulación simplificada se está cerca de superar el ensayo físico.

Es importante comentar que cada firma constructora de vehículos fija los requerimientos basados en su experiencia, por lo que las exigencias de un MPP de una empresa no tienen por qué coincidir con las de otra marca.

Los ensayos se agrupan como:

- De montaje
- De control dimensional
- De malos usos de componentes (*Mis-use*)
- De rigidez estática a distintas temperaturas. Rigidez de fijaciones
- De rigidez dinámica. Autoinertancia (interacción estructura-sonido altavoz)
- De durabilidad de componentes
- De almacenamientos climáticos
- De impacto; *drop test*
- De estanqueidad (polvo y agua)
- De comportamiento en vehículo: frecuencias, *crash*, ...

Para la verificación de la estrategia de caracterización del presente estudio se selecciona los ensayos de rigidez estática a temperatura ambiente. De todos los ensayos con exigencias de rigidez, se han escogido los de abolladura sobre todo el panel.

Se describe, a nivel gráfico, las exigencias de esta experimentación, extraída de un cuaderno de cargas especificado por una firma constructora de automóviles.

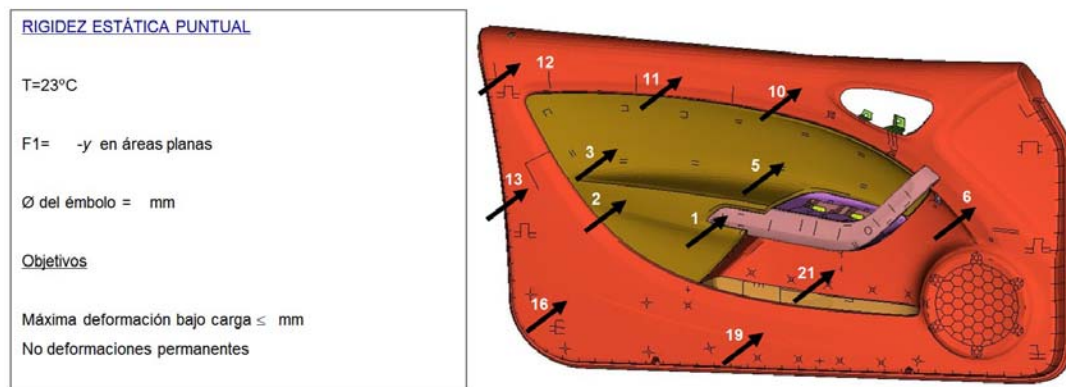


Figura 7.8. Definición de los ensayos de validación de Rigidez estática puntual*

* Valores no mostrados según criterios de confidencialidad

7.3. RESULTADOS

7.3.1. RESULTADOS TEST EXPERIMENTAL

Los ensayos se han llevado a cabo mediante un equipamiento S21014-20, con célula de carga HBM S9 de 2 KN, en los laboratorios internos de la empresa *Faurecia Interior Systems*.



Figura 7.9. Módulo estructural para anclaje de la puerta

El Módulo Panel Puerta se ha montado sobre el marco estructural de acero de la puerta, y este conjunto sobre el módulo de ensayo, reproduciendo las condiciones de enlace reales del conjunto. Se registra, en cada punto, la curva progresiva de 0 al valor final de carga, para evaluar posibles movimientos o roturas de soldaduras plásticas u otros elementos de unión del ensamblaje.

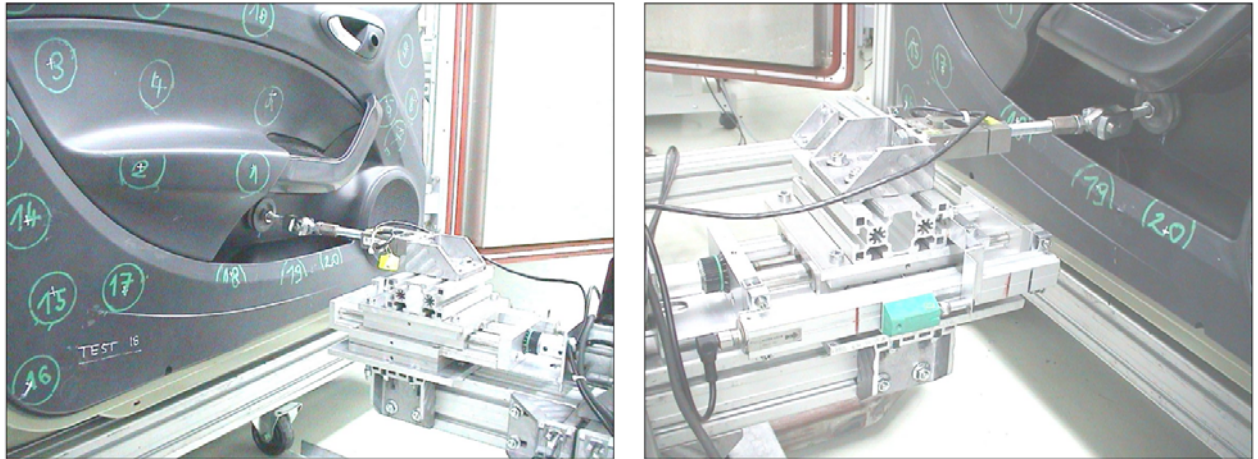


Figura 7.10. Aplicación de la fuerza mediante célula de carga, ensayo Rigidez estática puntual.
Lectura del corrimiento en la dirección de aplicación de cargas. Punto 21[2]

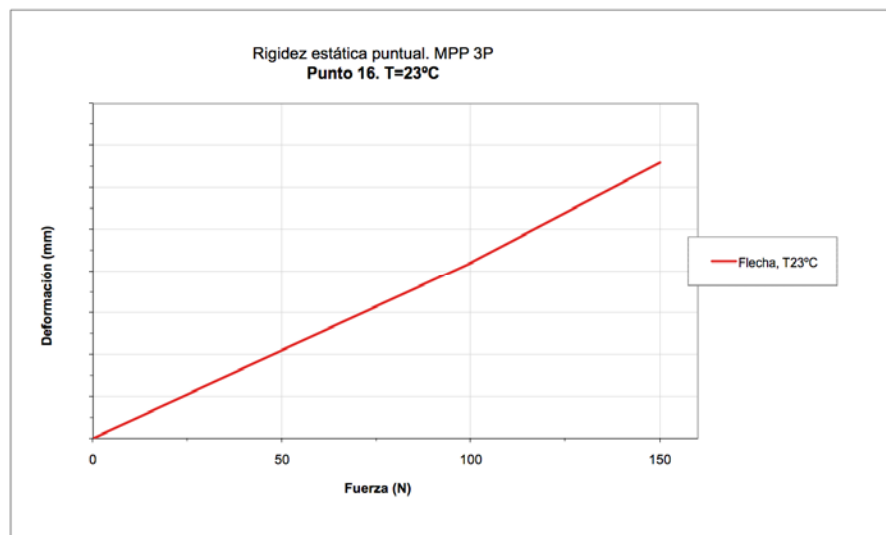


Figura 7.11. Gráfica de ensayo para el Punto 16, 23°C. Rigidez estática puntual*

* Resultados de deformación no mostrados según criterios de confidencialidad

Estos valores se tratan como referencia (Ref.), para comparativa relativa con los otros obtenidos en simulación.

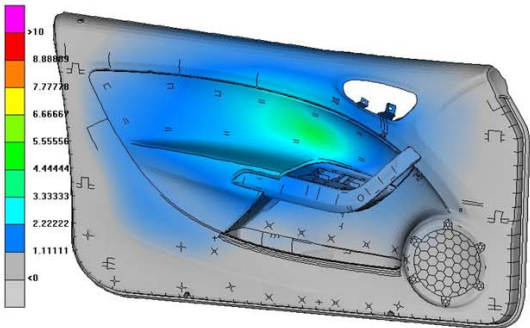
7.3.2. RESULTADOS MODELOS CAE

La Tabla 7.1 agrupa los resultados obtenidos mediante los dos modelos de simulación.

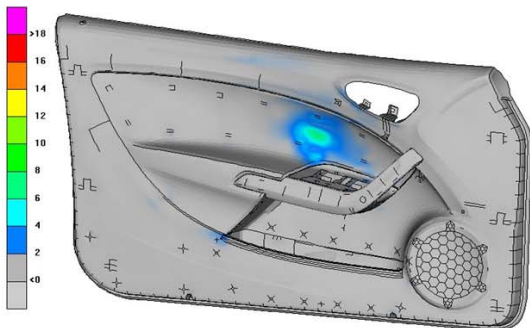
Punto	Deformación Test fisico(mm)	Deformación simulación Modelo Metodología (%)	Deformación simulación Modelo Ideal Industria (%)	σ_{Max} simulación Modelo Metodología (MPa)	σ_{Max} simulación Modelo Ideal Industria (MPa)
1	Ref.	6	-6	<21	<24
2	Ref.	16	-10	<21	<24
3	Ref.	0	-12	<21	<24
5	Ref.	11	-10	<21	<24
6	Ref.	22	0	<21	<24
10	Ref.	10	-8	<21	<24
11	Ref.	11	-8	<21	<24
12	Ref.	-2	-7	<21	<24
13	Ref.	9	-6	<21	<24
16	Ref.	6	-12	<21	<24
19	Ref.	7	-14	<21	<24
21	Ref.	10	-11	<21	<24

Tabla 7.1. Resultados CAE y test experimental. Rigidez estática puntual sobre MPP

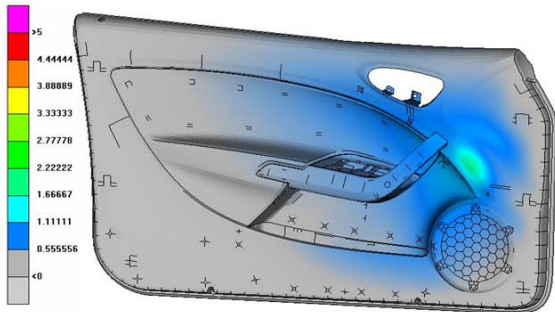
Se muestra a continuación los resultados de una selección de puntos, para el modelo Metodología.



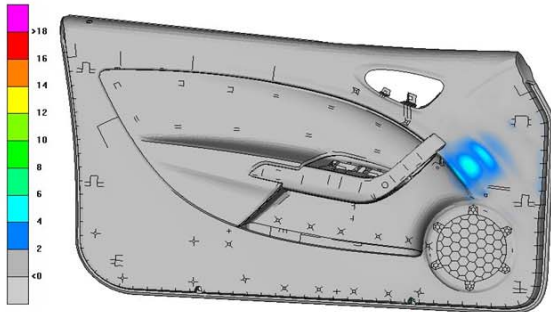
Punto 5. Diagrama de corrimientos



Punto 5. Diagrama de tensiones equivalentes de Von Mises

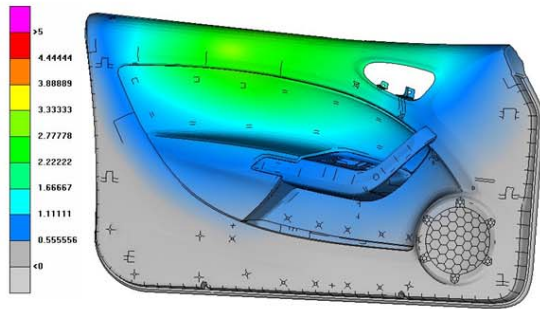


Punto 6. Diagrama de corrimientos

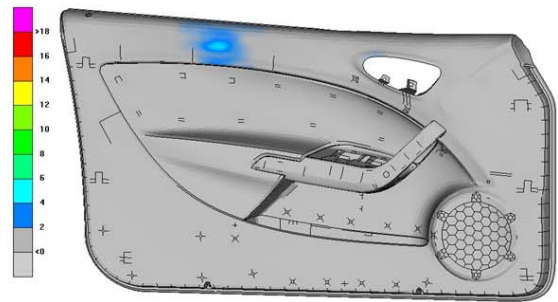


Punto 6. Diagrama de tensiones equivalentes de Von Mises

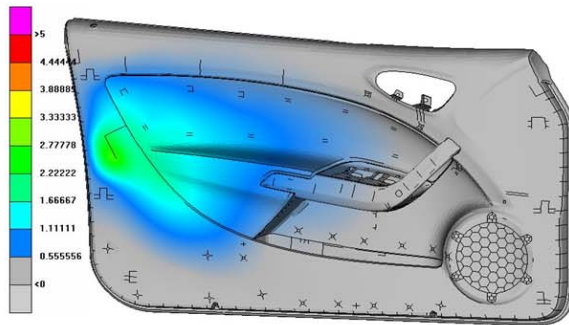
Figura 7.12. Diagramas de deformaciones y tensiones. Modelo Metodología. Varios puntos



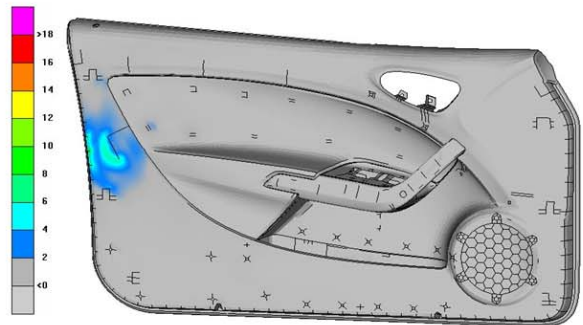
Punto 11. Diagrama de corrimientos



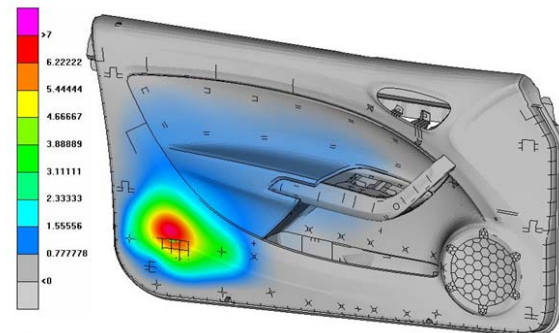
Punto 11. Diagrama de tensiones equivalentes de Von Mises



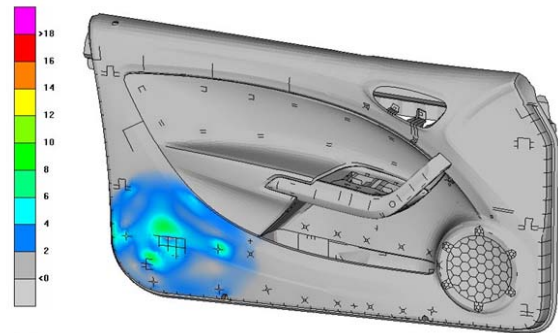
Punto 13. Diagrama de corrimientos



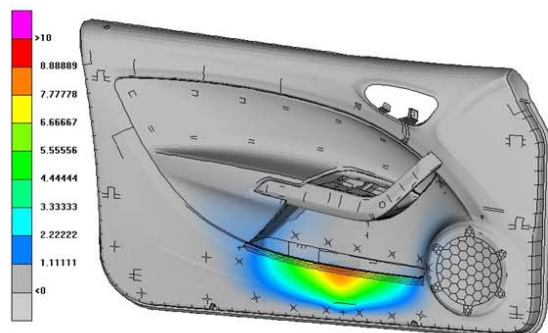
Punto 13. Diagrama de tensiones equivalentes de Von Mises



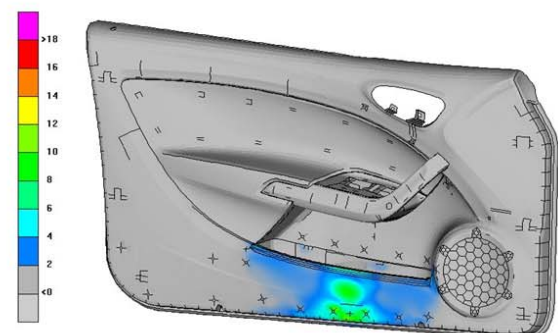
Punto 16. Diagrama de corrimientos



Punto 16. Diagrama de tensiones equivalentes de Von Mises



Punto 19. Diagrama de corrimientos



Punto 19. Diagrama de tensiones equivalentes de Von Mises

Figura 7.13. Diagramas de deformaciones y tensiones. Modelo Metodología. Varios puntos

Los valores de deformación máxima se han especificado en Tabla 7.1 en relación al valor del test físico, en tanto por ciento, para cada punto.

Los mapas de corrimientos para el modelo con las curva ideales (Modelo Ideal Industria) son equivalente a los mostrados, pero con escala distinta (ver Tabla 7.1, valores de flecha).

La distribución de tensiones discrepa ligeramente debido a la definición de límite de fluencia bajo (Modelo Ideal Industria). El nivel de tensiones no es elevado, por lo que el falseo de la distribución local de tensiones no resulta tan acusado.

7.3.3. CORRELACIÓN LABORATORIO VIRTUAL - LABORATORIO FÍSICO

Todos los puntos superan los requerimientos del ensayo, tanto por lo que se refiere a deformaciones como a tensiones (Tabla 7.1). Ningún punto llega a superar el límite de fluencia, por lo que no existen deformaciones remanentes, para ambas simulaciones.

Se aprecia menor rigidez en los valores de la simulación Modelo Metodología respecto a los obtenidos en test físico. Esto es debido a que la pendiente de la curva en el tramo lineal (Módulo Elástico de Cálculo) es más baja que la de la curva real del material. Consecuentemente, este tipo de simulación tenderá a presentar valores de corrimiento ligeramente mayores que los reales, especialmente para pequeñas deformaciones.

Por otro lado, la simulación con curva ideal con límite de fluencia falseado a valores muy bajos (Simulación Ideal) muestra un comportamiento más rígido que el real de la estructura. Al seguir la curva ideal en todos sus puntos (desde cerca del origen debido al valor modificado del límite de fluencia), ésta siempre es más alta que la del comportamiento real del material (que por motivos de inyección ha disminuido en propiedades mecánicas). Se cree que el comportamiento del modelo constitutivo como elastoplástico a muy bajos valores de deformación afecta poco al corrimiento para estos casos de carga. En situaciones donde sea necesaria la descarga para capturar deformaciones residuales podrá percibirse mayor error.

7.4. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. M. Puigoriol, “MPP - model. Mesh Quality Control. CAE Reference Points Systems.” Faurecia Interior System España, Abrera, 2007.
- [2] A. Grandal, “Test Report MPP -. Rigidity performance test.” Faurecia Interior Systems, Abrera, 2008.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES. FUTUROS DESARROLLOS

En este último capítulo se redactan las conclusiones más destacadas del presente trabajo, así como las aportaciones más relevantes originadas por la investigación llevada a cabo. En el último punto se exponen propuestas de futuras extensiones que puedan derivarse de la presente tesis doctoral.

8.1. CONCLUSIONES

En referencia al objetivo principal planteado en el primer capítulo, redactado como definir una metodología para una nueva estrategia de caracterización cuasi-estática en base a uno de los modelos constitutivos existentes en los software FEM del mercado, y en base al ejemplo planteado a partir de piezas inyectadas de cuatro materiales termoplásticos en proceso industrial, y en función de los resultados obtenidos mediante laboratorio físico y virtual, se llega a las siguientes conclusiones:

- Como modelo base se selecciona el modelo elastoplástico con endurecimiento Isotrópico de Von Mises, con regla de flujo asociada, por motivos simplicidad.

- Se descarta usar el modelo hiperelástico, principalmente por la dificultad que conlleva el cálculo de las constantes de la ecuación constitutiva (depende directamente del material). Son necesarios ensayos de tracción y de compresión para un buen comportamiento biaxial del modelo. A su vez, los tiempos computacionales son más altos que mediante uso de otros modelos.
- Se descarta el uso del modelo elástico multipendiente por no dar respuesta a problemáticas de plastificación. El comportamiento describe una respuesta conservativa por lo que no se ajusta a la realidad elastoplástica, que es dependiente del camino de carga. En consecuencia, retirando las fuerzas sobre la estructura se recupera el 100% de la deformación.
- Se descartan otros tipos de modelos constitutivos de mayor complejidad debido a la necesidad de disponer de datos de ensayo/s adicional/es al de tracción en máquina universal, si bien estas ecuaciones pueden dar una mayor precisión en la respuesta obtenida. Un ejemplo es el modelo de Drucker-Prager, contemplando la dependencia con la tensión hidroestática.
- Se seleccionan las Variables Curva: Temperatura, Velocidad de deformación, Límite de Fluencia de Cálculo, Corrección a valores verdaderos, Corrección de la tensiones más allá de la máxima, Tipo test y Tipo de extensómetro, como variables a contemplar en la metodología, por presentar influencia significativa en la respuesta.
- Se descarta el parámetro Variación del coeficiente de Poisson por requerir de un sistema de extensómetro de doble lectura. Tampoco se contempla la Influencia de la orientación según flujo de inyección, como variable a implementar de forma computacional, por motivos de complejidad. Esta variable se trata, como otros parámetros relacionados con la inyección, mediante el parámetro Factor de Escala Máster, obtenido a través del procedimiento expuesto en el presente trabajo.
- Por lo que se refiere a las variables MEF, se contempla la Ecuación constitutiva, Tipo de elemento, Grado del elemento, Calidad de malla y Densidad de malla. Se descarta la introducción de un coeficiente de fricción para este tipo de simulación cuasi-estática. De forma optativa puede contemplarse el uso de la ley exponencial para la variable Rigidez del elemento de contacto, en aquellos casos de problemáticas computacionales.

- Como fruto del caso práctico realizado con los datos suministrados por *Faurecia Interior Systems Abrera*, se ha determinado la disminución de propiedades de 4 materiales a partir de muestras recortadas de 10 componentes. De este trabajo se deduce el Factor de escala Máster del 11% para la familia PPT y del 17% para la del ABS.
- Adicionalmente se han tratado dos componentes para una primera visualización del efecto del envejecimiento natural sostenido a lo largo de los años. En base a estos datos, se estima que el efecto de envejecimiento puede ser significativo en los últimos años de vida del producto. Sin embargo, el procedimiento llevado a cabo para acondicionar las muestras de este tipo ensayo no resulta viable a efectos de simplicidad, para un efecto industrial. En coherencia con lo expuesto, no se contempla la estimación del envejecimiento natural en la metodología presentada. Se piensa en futuras investigaciones respecto a esta variable, pudiéndose definir un nuevo factor de escala que tuviera en cuenta este efecto.
- La correlación realizada para el conjunto Tapa Asidero muestra un comportamiento de mayor rigidez en los modelos implementados con sólidos versus el test físico. Se selecciona como ley de endurecimiento para la familia ABS y PPT la *Endurec2*, correspondiente a la ecuación con factor exponencial cuadrático. El modelo con la caracterización de la metodología presentada siguiendo la ley de endurecimiento *Endurec2* presenta la mejor respuesta versus el test físico.
- Por lo que se refiere al modelo Tapa Sólidos Ideal Industria, correspondiente a la caracterización clásica utilizada en la industria, el comportamiento obtenido es significativamente más rígido que el test físico, presentando menor ajuste en la correlación que el modelo con la propuesta planteada en la presente tesis. Se concluye que la caracterización propuesta en este trabajo conduce a mejores resultados que la actual en uso industrial, en modelos de detalle.
- Para el modelo Tapa Placas, implementado con elementos tipo *Shell*, la fuerza necesaria para obtener la flecha exigida de 15 mm es menor que la del test físico. Es importante remarcar que, en este caso, los errores debidos a la modelización con este tipo de elemento se contrarrestan en parte con los obtenidos debido al uso del modelo constitutivo de Von Mises.

- La correlación realizada en un conjunto Módulo Panel Puerta mediante experimentación física y simulación muestra que esta nueva estrategia de caracterización logra resultados cercanos a los reales, con tendencia a presentar menor rigidez que la real. Para su uso en simulaciones de desarrollo de producto, situarse en el lado desfavorable (en cuanto a rigidez) puede ser incluso beneficioso para lograr diseños con buen comportamiento estructural.
- Esta misma correlación ha mostrado que el uso del modelo clásico elastoplástico con valor del límite de fluencia falseado conduce a valores de rigidez mayor que los reales.
- En base a lo expuesto se concluye que el modelo para esta nueva caracterización presentado puede ser muy válido para uso industrial en códigos numéricos.

8.2. APORTACIONES

En este apartado se presentan las aportaciones más relevantes obtenidas del presente trabajo:

- Definición de las variables más relevantes a considerar para simulación cuasi-estática estructural, que cumplen la premisa de simplicidad.
- Procedimiento de estimación del efecto del proceso de inyección sobre la respuesta mecánica del material. Creación del Factor de Escala Máster, para cada familia de materiales.
- Desarrollo de una metodología para caracterización elastoplástica que permite, de forma simplificada, contemplar aquellas variables influyentes en la respuesta estática.
- Validación del modelo constitutivo elastoplástico de Von Mises para uso con materiales plásticos, para estática estructural, mediante el ensayo de flexión-torsión de una pieza real inyectada.
- Verificación de la propuesta planteada en ejercicio real de industria.

8.3. FUTUROS DESARROLLOS

A continuación se proponen futuras líneas de trabajo derivadas de la presente tesis:

- Completar la metodología para más familias de materiales termoplásticos, en referencia al Factor de Escala Máster.
- Definir un nuevo factor que contemple el efecto del envejecimiento natural del material frente a la radiación solar. Esta definición debe optimizarse en cuanto a simplicidad de ensayos se refiere.
- Establecer la metodología para otro modelo constitutivo, de mayor grado de complejidad, que contemple la componente hidroestática del tensor tensión. Valorar la ganancia de la calidad de la respuesta frente a la complejidad introducida, contemplando su uso industrial.

ANEXO A

ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIALES PLÁSTICOS

Ensayo de tracción DIN 53455

Nota:

Aparte de las nuevas denominaciones, antes referidas, para los parámetros del ensayo de tracción, hay otras que hasta ahora fueron usuales: σ_s y ϵ_s , σ_B y ϵ_B , σ_R y ϵ_R .

En el ensayo de tracción de DIN 53455, las características del material se determinan mediante sollicitación uniaxial y reparto inicial homogéneo de la tensión a lo largo de toda la sección. En los plásticos deformables tiene lugar posteriormente un estrangulamiento.

Los parámetros obtenidos en el ensayo de tracción proporcionan aspectos importantes de la resistencia y alargamiento de los plásticos. Cuáles de los parámetros aludidos son los que deben determinarse; deberá contestarse en función del comportamiento de los plásticos (ver evaluación). Los parámetros pueden servir para el control de calidad, para las especificaciones y para el cálculo de piezas sometidas a esfuerzos breves.

Los ensayos de tracción se realizan en termoplásticos, termoestables, plásticos reforzados con fibra de vidrio, láminas y cintas de envasado fabricadas con termoplásticos biorientados.

Las probetas se prepararon por prensado o inyección según DIN 16770 o bien por arranque de viruta mediante aserrado de planchas o piezas; los recortes de muestra de las cintas de envases deberán tener una longitud determinada; las muestras a partir de láminas se cortan o se troquelan.

En general hay tres formas usuales de probeta:

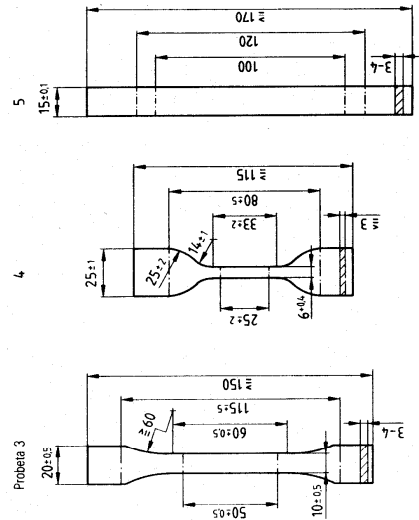


Figura 32.1 Probeta n° 3, utilizada normalmente para termoplásticos y termoestables
Probeta n° 4, por ejemplo para PVC plastificado y otros termoplásticos blandos y elastómeros
Probeta n° 5, preparada preferentemente a partir de planchas y láminas, y de láminas y GFK

32 Ensayo de tracción DIN 53455

Coincide básicamente con la norma ISO/DP 527, pero sin la determinación del módulo de elasticidad.

Normas complementarias:

DIN 53457 Determinación del módulo de elasticidad en ensayo de tracción, compresión y flexión (ver cap. 35).

DIN EN 61 Ensayo de tracción para laminados.

DIN 53397 Determinación de la resistencia a la tracción interlaminar.

DIN 53392 Resistencia a la tracción, alargamiento y módulo de elasticidad de laminados de refuerzo unidireccional.

DIN 65378 Ensayo de tracción para laminados de refuerzo unidireccional con aplicación de la fuerza en sentido transversal a la dirección de las fibras.

DIN 53430 Ensayo de tracción para espumas rígidas.

DIN 53571 Ensayo de tracción para espumas blandas.

DIN 53504 Ensayo de tracción para elastómeros.

DIN 16770 Probetas de masas termoplásticas.

Parte 1. Prensado de planchas y probetas; coincide básicamente con la norma ISO/DIS 293.3.

Parte 2. Inyección de probetas; coincide básicamente con la norma ISO/DP 294.

Parte 3. Determinación de la contracción longitudinal máxima; coincide básicamente con la norma ISO/DP 8328.

Parte 4. Preparación de probetas en forma de varilla con una contracción longitudinal máxima definida; coincide básicamente con la norma ISO/DP 2557/1.

Parámetros¹⁾

σ_s	Tensión de estiraje	(σ_s)
ϵ_s	Alargamiento en límite elástico	(ϵ_s)
σ_{RM}	Resistencia a la tracción	(σ_M)
ϵ_{RM}	Alargamiento en tensión máxima	$(\epsilon(\sigma_M))$
σ_R	Tensión de tracción a la rotura	(σ_R)
ϵ_R	Alargamiento a la rotura	(ϵ_R)
σ_{Tx}	Tensión de tracción al x % de alargamiento	(σ_x)
ϵ_{Tx}	x % de alargamiento	(ϵ_x)
(E)	Módulo de elasticidad, ver cap. 35)	(E)

¹⁾ Las denominaciones corresponden al proyecto de norma DIN 53455, mientras que las que están entre paréntesis son de la norma ISO/DP 527.

El espesor de la probeta, si se obtiene a partir de masas de molde, será a ser posible de 3 o 4 mm. A partir de planchas o de láminas, un máximo de 10 mm (el mismo espesor que el material acabado del que se extrae la muestra); en las piezas inyectadas se buscará una zona que tenga un espesor de pared similar.

Las muestras deberán estar exentas de defectos y deterioros. Si se requiere un mecanizado posterior, sólo se efectuará en sentido longitudinal. A partir de planchas y láminas se tomarán muestras longitudinales y transversales.

Para el ensayo se tomarán muestras longitudinalmente 5 probetas; en caso de materiales anisotrópicos se toman 5 probetas en cada dirección. Antes del ensayo las probetas se mantienen 16 h en clima normalizado DIN 50014-23/50-2. Para las láminas se ensayan, según el espesor, de 10 a 15 probetas.

El ensayo se realiza en dinamómetros según DIN 51221 con velocidad regulable y un registro gráfico para trazar las curvas tensión-alargamiento correspondientes. El sistema de medida de la fuerza debería actuar a ser posible con poca influencia de la traslación o de la inercia. Para medir el alargamiento con precisión se requiere un dispositivo electrónico de medición fina del mismo, sobre todo para determinar el módulo de elasticidad. Si la longitud de la probeta sufre un estiramiento muy considerable (> 50 mm), como puede ser en el caso de termoplásticos biorientados o láminas blandas, basta con medir la variación de distancia entre las pinzas para determinar el alargamiento.

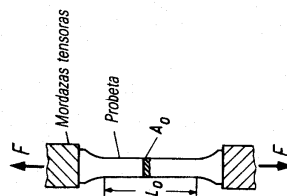


Figura 32.2

Nota: en el ensayo de plásticos, los alargamientos se miden como *alargamiento total bajo tensión*, mientras que en los metales se miden como *alargamientos remanentes* una vez cesada la tensión.

Las probetas tienen que medirse por lo menos en cinco puntos dentro de la longitud marcada; la diferencia de medición no debe ser mayor que 0,1 mm. El espesor de pared a se mide con una exactitud de $\pm 0,01$ mm; la anchura b con $\pm 0,05$ mm.

La probeta se coloca dentro de las pinzas tensoras, de manera que se adapten bien y tengan efecto de cuña, con accionamiento neumático o hidráulico. La fuerza inicial no debe ser demasiado alta, porque de lo contrario podría falsear el resultado del ensayo. La probeta no debe deslizarse de dentro de la pinza. El ensayo

se deberá realizar en clima normalizado DIN 50014-23/50-2 o en otro cualquiera que se convenga.

La velocidad de estiramiento es la velocidad de separación de las pinzas, que puede regularse de acuerdo con las normas del producto, preferentemente $v = (1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500)$ mm/min.

Nota: la misma velocidad de aparato para distintas longitudes de probeta significa que se aplica una velocidad de estiramiento distinta.

Para evaluar mejor un plástico es necesario realizar el ensayo de tracción en distintas condiciones (de velocidad, temperatura, acondicionamiento previo, etc.).

La **evaluación** se realiza de forma manual a partir de las curvas de tensión-alargamiento que proporciona el registro gráfico, a partir de los valores que se leen en el mismo dinamómetro, o bien a partir de los valores que facilita un ordenador con CAT (Computer Aided Testing).

Mediante una disposición idónea del ensayo se puede determinar también el número de Poisson o el índice de contracción transversal a partir del alargamiento longitudinal y de la contracción transversal.

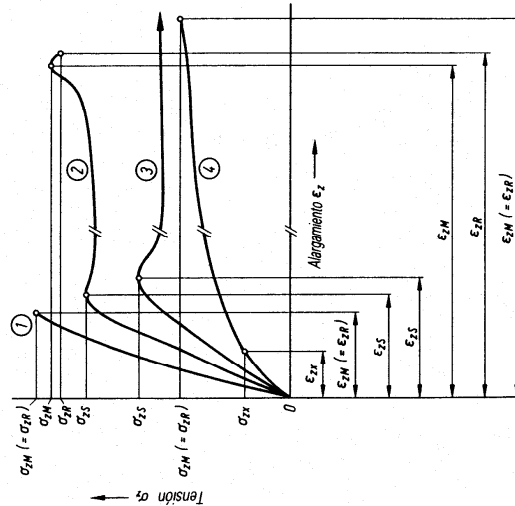


Figura 32.3 Diagramas tensión-alargamiento (tracción)
1 plástico quebradizo, 3 plástico estirable,
2 plástico deformable, 4 plástico plastificado.

Parámetros: tensiones en N/mm² o en MPa
alargamientos en %

Según el comportamiento del material, se determinan distintos parámetros.

Plásticos deformables

En tal caso se determinan, por lo general, según:

- Tensión de estiraje $\sigma_{ES}(\sigma_T)$ Alargamiento en límite elástico $\epsilon_{ES}(\epsilon_e)$
- Resistencia tracción $\sigma_{RM}(\sigma_M)$ Alargamiento tensión máxima $\epsilon_{RM}(\epsilon_M)$
- Tensión tracción rotura $\sigma_{RR}(\sigma_R)$ Alargamiento a la rotura $\epsilon_R(\epsilon_k)$

La tensión de estiraje σ_{ES} se define como la tensión de tracción en la que la pendiente de la curva tensión-alargamiento es, por primera vez, igual a 0 («tangente horizontal»). Cuando no existe una tensión de estiraje σ_{ES} marcada, puede ser conveniente hallar la tensión de tracción a un x % de alargamiento, es decir $\sigma_{x\%}$. En la práctica se suelen hallar $\sigma_{0,5}$ o $\sigma_{2,1}$ si $x = 0,5$ % o $x = 2,1$ %, respectivamente.

La resistencia a la tracción σ_{RM} es la tensión máxima y puede coincidir con la tensión de tracción a la rotura σ_{RR} .

Nota: en los termoplásticos muy deformables, sobre todo después de un estirado fuerte, puede ocurrir que $\sigma_{RM} = \sigma_{ES}$ o bien $\sigma_{RM} = \sigma_{RR}$. En tal supuesto, sólo tiene sentido indicar σ_{ES} y σ_{RR} ; de todos modos, σ_{RR} depende de las condiciones de ensayo inicial, de la naturaleza de la superficie y de la forma de la probeta. Por lo general, σ_{RR} no es un valor utilizable; en tal caso, la fuerza remanente F_{RR} puede emplearse para valorar la *sujeción*, habida cuenta de la sección de rotura A_R :

$$\text{relación de sujeción} = \frac{F_{RR}/A_R}{F_{ES}/A_0}$$

Plásticos frágiles, láminas y bandas estiradas

En este caso se determinan, por lo general:

resistencia a la tracción σ_{RM} y alargamiento en tensión máxima ϵ_{RM} .
En el ensayo de láminas y bandas puede indicarse también la tensión de tracción a la rotura σ_{RR} y el alargamiento a la rotura ϵ_R , pero por lo general se considera que $\epsilon_{RM} = \epsilon_R$.

Según su comportamiento durante el ensayo, la muestra se dice que ha tenido una deformación del tipo *estrangulamiento*, *estiramiento* o *desgarro*; también se puede evaluar su *aspecto* después de la rotura.

Notas

En tablas comparativas de distintos plásticos se debería indicar si se está hablando de los parámetros σ_{ES} , de σ_{RM} o de σ_{RR} . Los factores que más repercuten en los valores obtenidos para los parámetros son: la preparación, la forma y el tratamiento previo de las probetas, así como la velocidad y la temperatura de ensayo.

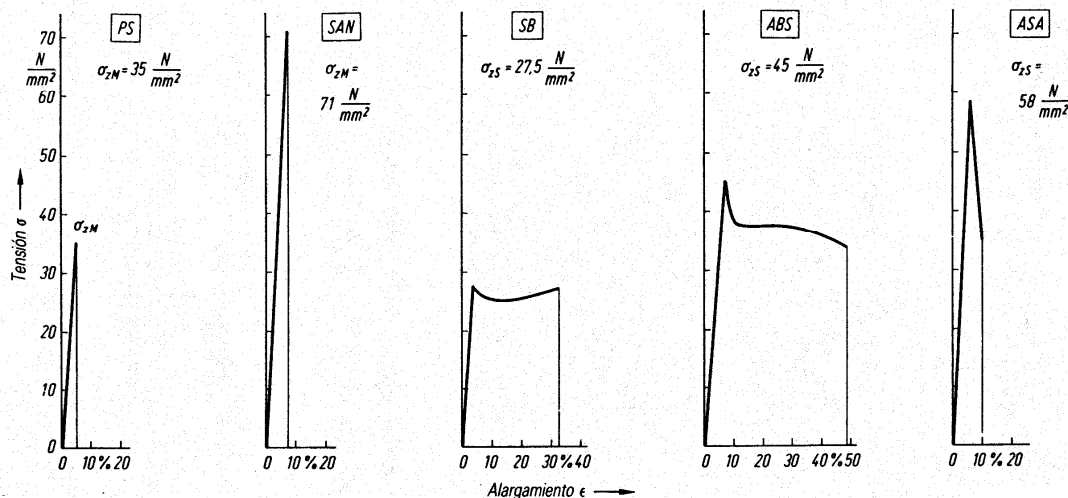


Figura 32.4 Diagramas tensión-alargamiento de modificaciones del PS: probetas según DIN 53455, $v = 10$ mm/min, $T = 21$ °C

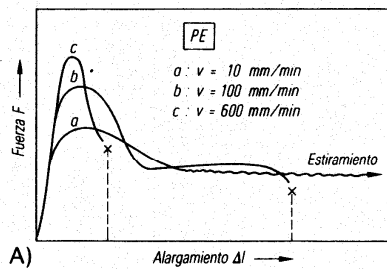


Figura 32.6 Repercusión de las distintas velocidades de ensayo sobre los parámetros del material, ilustrada con el PE (A) y el POM (B). Si aumenta la velocidad, aumenta también la tensión de estiraje; en cambio, disminuye la deformabilidad. Un fuerte calentamiento a velocidad de ensayo alta y mala evacuación del calor pueden aumentar la deformabilidad, como se ve en el POM.

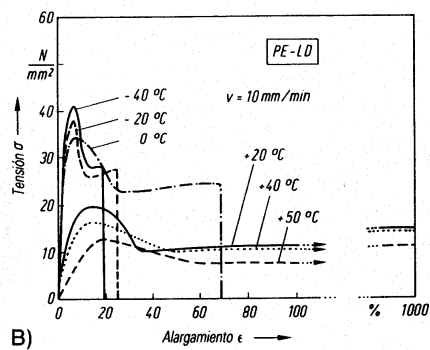
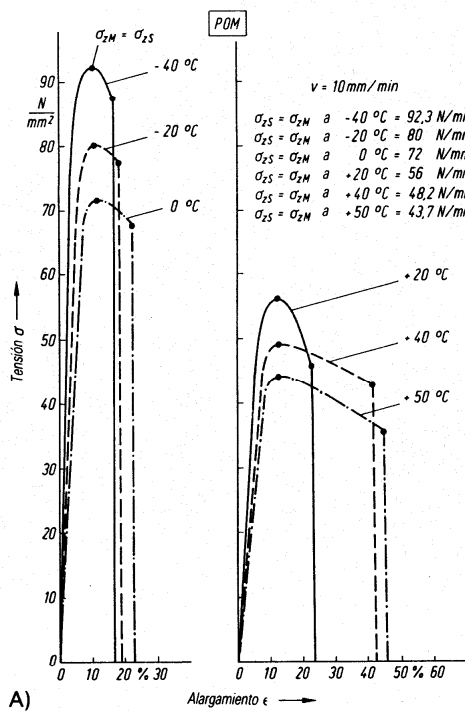
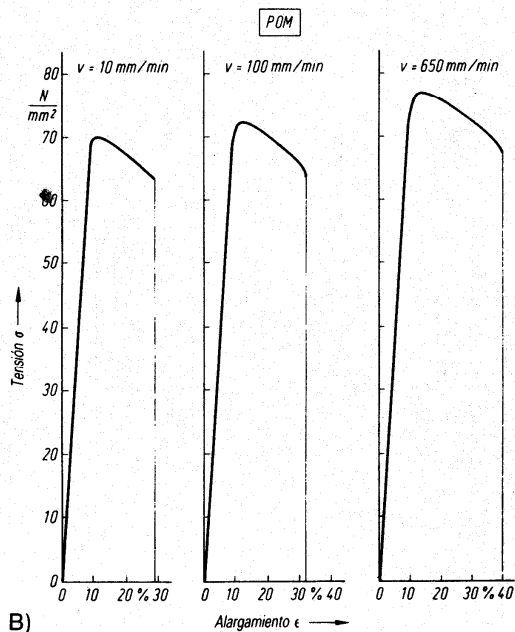


Figura 32.5 Repercusión de la temperatura de ensayo sobre los parámetros del material: ilustrada con el POM (A) y el PE-LD (B)

ANEXO B

FICHA CONTROL PARÁMETROS DE INYECCIÓN. COMPONENTE CONSOLA CENTRAL, MATERIAL PPT16a

- **Parámetros de inyección**

- Pieza: Cuerpo consola
- N° inyección: Primera inyección para estudio caracterización
- Lugar: -
- Moldista: -
- Transformador: -
- Proveedor material: -
- Material: PPT16a
- Tiempo de secado: 2 h. (en deshumidificador)
- Temperatura de secado: 80°C
- Molde: Prototipo
- N° entradas pieza: 7
- N° boquillas calientes: 6
- Clasificación del molde: Molde 2 placas + correderas
- Tipo de expulsión: Expulsores accionados por máquina
- N° de cavidades: 1
- N° Circuitos de atemperación del molde: 7
- Tª entrada: 40°C
- Tª salida: 40°C (no checkeada)
- Caudal: 100%
- Aceite: No
- Agua: Si

- **Unidad de inyección**

- Presión de inyección máxima: 1931 bar
- Volumen de inyección máxima: 2956 cm³
- Diámetro del husillo: 95 mm
- Relación L/D del husillo: 22
- Peso de inyección PS: 2690 g
- Velocidad de inyección máxima: 790 cm³/s

- **Unidad de cierre**

- Recorrido del extractor: 250 mm
- Diámetro de barras: 210 mm
- Carrera de apertura: 1150 mm

- **Varios**

- Boquilla cónica: Si
- Ángulo: 70°
- Diámetro interior: 4 mm
- Ángulo del bebedero: 70°
- Diámetro interior del bebedero: 5 mm
- Fuerza de cierre: 650 TM

- **Consignas de inyección**

- Límite propuesto: 1000 kg/cm²
- Presión de inyección máxima: 857 kg/cm²
- 1er mantenimiento: 200 kg/cm²
- 2do mantenimiento: 0 kg/cm²
- Contrapresión: 50 kg/cm²
- Dosificación: 275 mm
- Conmutación: 29 mm
- Cota cojín: 26.8 mm
- Descompresión: 10 mm
- R.P.M husillo: 130 rev/min

- **Temperaturas del plastificador**

Zona	T consigna	T real
1	250	250
2	245	245
3	240	240
4	235	235
5	230	230
6	225	225
7	220	220
8	215	215
9	210	210

(*) Zona 1: Zona puntera

- T^a masa: 241 °C
- T^a aceite de máquina: 45 °C
- T^a ambiente: 24 °C

- **Temperatura del canal caliente**

Boquilla caliente	
Zona	T real
1	240
2	240
3	240
4	240
5	240
6	26

Bloque caliente	
Zona	T real
1	250
2	250

- **Velocidades de inyección**

	Velocidad [mm/s]	Intervención [mm]
1ª fase	55	275
2ª fase	35	65
3ª fase	35	65
4ª fase	35	65
Última	35	65
Velocidad media [mm/s]		47

- **Presiones de inyección**

	Presión [kg/cm ²]	Intervención [mm]
1ª fase	857	275
2ª fase	857	275
Conmutación	827	29
1º mant	200	29
2ª mant	0	29

- **Distribución del tiempo de ciclo**

	[s]	%
Inyección	5.2	9
1º mantenimiento	5	8
2º mantenimiento	0	0
Enfriamiento	25	42
Robot	0	0
Apertura/cierre	0	0
Otros (expulsión, etc)	24.8	41
Tiempo ciclo [s]	60	100

- **Datos pieza**

- Peso pieza: 1448.5 g
- Peso colada: 19.50g
- Peso total inyectada: 1468 g
- Espesor medio: 2.5 mm
- Dimensiones aprox: 900 x 265 x 325 mm

ANEXO C

CODIFICACIÓN MUESTRAS EXTRAÍDAS DE PIEZAS INYECTADAS

N° inyección	
Primera	1
Segunda	2
Tercera	3

Componente	
Cuerpo Consola	CC
Inserto	INS
Pieza Estructural	PE
Panel Delantero	PD
Panel Trasero	PT
Armazón Asidero	AA

Proveedor	
Basell	B
Dow	D

Material	
PPT16	-
PPT30	-
ABS	-

Tipo ensayo	
Tracción	T
Flexión	F
Impacto flexión	IF

Temperatura ensayos	
23°C	23
60°C	60
90°C	90

Velocidad ensayo	
1-5 mm/min	V1
50 mm/min	V2
500 mm/min	V3
1000 mm/min	V4

Zona extracción probeta	
A	A
B	B
C	C
D	D
E	E

Ejemplo:

